



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE METODOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE PALADIO Y PLATINO

Memoria de Prácticas Profesionales

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

CLAUDIA VALERIA CORONADO FIGUEROA

Hermosillo, Sonora

septiembre 2023

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

UNIVERSIDAD DE SONORA

VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora, a 14 de septiembre de 2023.

DR. PAUL ZAVALA RIVERA
JEFE DEL DEPARTAMENTO
INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para evaluar su propuesta de Titulación por la Opción de Prácticas Profesionales con el Tema: "ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE METODOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE PALADIO Y PLATINO", presentado por:

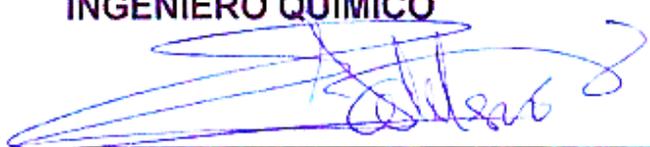
CLAUDIA VALERIA CORONADO FIGUEROA

La han revisado y cada uno de los integrantes da su VOTO APROBATORIO ya que cumple con los requisitos parciales para la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

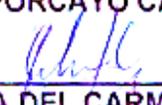
14/sep/2023

Fecha


DR. JESÚS PORCAYO CALDERÓN

14/sep/2023

Fecha


DRA. OFELIA DEL CARMEN HERNÁNDEZ NEGRETE

14/sep/2023

Fecha


M.C. JESÚS LEONEL SERVÍN RODRIGUEZ

14/sep/23

Fecha


DRA. CINDY ALEJANDRA GUTIÉRREZ VALENZUELA

DEDICATORIA

*A mis queridos padres, fuente
inagotable de fortaleza y amor, a
mis adorados hermanos,
compañeros de vida y risas, y a esa
persona que ilumina mi vida y que
jamás soltó mi mano. Este logro es
tanto de ustedes como mío.*

Valeria Coronado Figueroa

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a las personas y entidades que hicieron posible la culminación de este trabajo de tesis.

En primer lugar, quiero agradecer a mi dedicado tutor, Dr. Jesús Porcayo, por su guía constante y compromiso inquebrantable. Su conocimiento, orientación y apoyo fueron esenciales en cada paso del camino.

Mi gratitud se extiende a la Universidad de Sonora, por proporcionarme los recursos académicos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

También quiero reconocer y agradecer a Metalúrgica de Cobre, empresa que generosamente me ofreció la oportunidad de realizar este proyecto de pasantía. Estoy agradecida por la experiencia invaluable que gané trabajando con su equipo.

A todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a este logro, les agradezco profundamente por su paciencia y confianza en mí. Su apoyo en mi desarrollo académico y profesional es inestimable.

ÍNDICE

Aviso de confidencialidad.....	11
Introducción.....	12
Justificación.....	16
Planteamiento del problema	18
Alcances	20
Objetivo del proyecto.....	21
Marco teórico	21
1.1 Descripción del área de desarrollo del proyecto.....	21
1.1.1 Antecedentes históricos	21
1.2 Proceso general de Metalúrgica de Cobre	24
2 Planta de metales preciosos	30
2.1 Generalidades de los metales preciosos.....	32
2.2 Descripción de proceso	34
2.2.1 Tratamiento primario de lodos anódicos	35
2.2.2 Proceso de recuperación de selenio	39
2.2.3 Electrodeposición de plata	40
2.2.4 Refinación de oro	41
3 Antecedentes del proyecto.....	43
3.1 Paladio	43
3.1.1 Generalidades	43
4 Proceso de recuperación de paladio y platino de la PMP (Metalúrgica de Cobre) ...	52
5 Metodología experimental.....	65
5.1 Prueba 1	67
5.1.1 Fundamento	67

5.1.2 Procedimiento	67
5.1.3 Observaciones	69
5.2 Análisis de resultados.....	72
5.3 Prueba 2.....	74
5.3.1 Fundamento	74
5.3.2 Procedimiento	74
5.3.3 Observaciones	76
5.3.4 Análisis de resultados	77
Conclusiones y recomendaciones.....	80
Retroalimentación	81
Referencias	83

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de metales preciosos ^[13]	31
Tabla 2 Composición de lodo anódico	35
Tabla 3	45
Tabla 4 EDS.....	54
Tabla 5 Composición de CMP calcinado.....	56
Tabla 6 Lixiviado de CMP	58
Tabla 7 Análisis	59
Tabla 8 Análisis	60
Tabla 9 Análisis	60
Tabla 10 Análisis.....	61
Tabla 11 Concentración después de dilución.....	62
Tabla 12 Análisis de pureza	72
Tabla 13 Comparación de resultados.....	73
Tabla 14 Composición de efluentes, Prueba 2.....	78
Tabla 15 Análisis de calidad de muestras metálicas, Prueba 2	79

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Panorama Minero del Estado de Sonora ^[24]	12
Figura 2 Concesiones mineras del estado de Sonora ^[24]	13
Figura 3 Composición de concentrado de metales preciosos calcinado	16
Figura 4 Ubicaciones mineras iniciales de Grupo México	21
Figura 5 Estructura corporativa de Grupo México ^[7]	23
Figura 6 Proceso general de obtención de cobre (MetCob)	25
Figura 7 Proceso general de la planta de metales preciosos ^[14]	34
Figura 8 Esquema del horno kaldo para la producción de metal dore ^{[14][15]}	36
Figura 9 Proceso general para la obtención de selenio ^[15]	39
Figura 10 Reactor de vidrio para precipitación de oro ^[15]	42
Figura 11 Evolución del precio del paladio por USD\$/onza 2012-2021 ^[19]	48
Figura 12 Producción minera de paladio a nivel mundial ^[23]	49
Figura 13 Procedencia de la producción anual de paladio (Pd). ^[23]	50
Figura 14 Consumo porcentual anual por país. ^[23]	50
Figura 15 Operaciones de refinería de oro	53
Figura 16 Proceso general para la obtención de paladio	55
Figura 17 Proceso de precipitación	64
Figura 18 Proceso de obtención de solución madre	66
Figura 19 Proceso de purificación	70
Figura 20 Muestras metálicas de Pd (2) y (1)	71
Figura 21 Proceso general de Prueba 2	75
Figura 22 Representación visual de las etapas de precipitación	77

Figura 23 Muestras metálicas de los ensayos 1 y 2..... 77

RESUMEN

En este estudio de investigación, se llevó a cabo un exhaustivo análisis para la refinación del paladio con la finalidad de perfeccionar el proceso de obtención de este metal. A través de una metodología experimental que buscó una optimización integral del proceso de producción. Con el objetivo general de abordar, de forma documentada y cuantificable, diversos aspectos relacionados con la seguridad y calidad en las diferentes etapas del proceso de obtención de paladio.

La metodología empleada se dividió en dos fases. La primera se enfocó en la sustitución de un reactivo previamente empleado en el proceso de ajuste de pH de la solución, con la finalidad de obtener una solución más pura y, al mismo tiempo, mejorar la seguridad en el manejo del reactivo. La segunda parte, se centró en el refinamiento del paladio, valiéndose de procesos químicos específicos, partiendo de los resultados obtenidos en la fase previa.

A lo largo de estas pruebas experimentales se arrojaron hallazgos de gran relevancia. Se resaltó la eficacia de un nuevo reactivo en comparación con su predecesor, demostrando ser menos riesgoso y más adecuado para el proceso. Además, se exploró una innovadora perspectiva al considerar la introducción de una etapa adicional al procedimiento general, con el objetivo de potenciar la pureza del paladio.

Este estudio pudo confirmar que la metodología experimental demostró ser efectiva en el logro de los objetivos planteados. Los resultados obtenidos en este estudio aportan significativamente a la mejora de la calidad del paladio y a la eficiencia general del proceso.

Aviso de confidencialidad

Este documento ha sido editado y adecuado de acuerdo con la política de privacidad y confidencialidad de Metalúrgica de Cobre S.A. de C.V.

Para garantizar la privacidad y seguridad de datos confidenciales, se ha adecuado la información que aquí se presenta, con el fin de delimitar parámetros, etapas y toda información que pueda revelar detalles confidenciales de la empresa. Se omitieron datos de acceso restringido para así, cuidar y proteger la propiedad intelectual.

Se ha llevado a cabo una cuidadosa selección de información no confidencial, garantizando así la seguridad y privacidad de los datos relevantes.

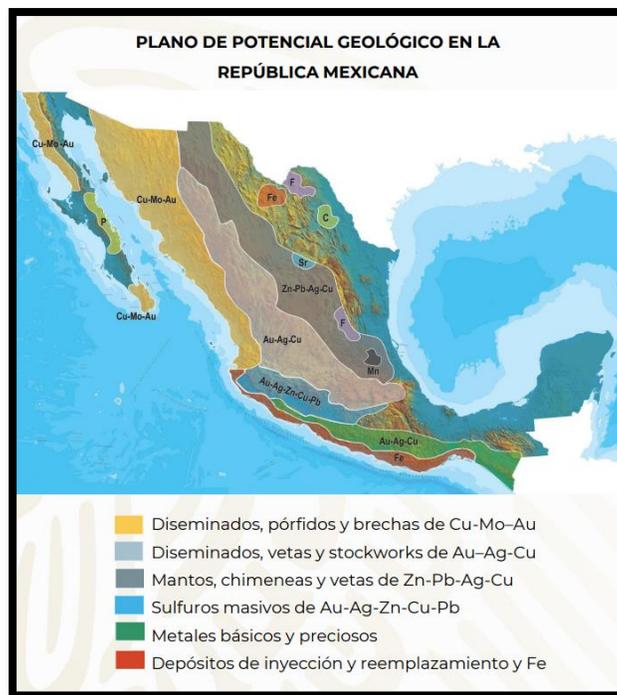
En relación con este informe, es importante subrayar que todas las modificaciones realizadas, así como la información que haya sido suprimida o adecuada según los estándares mencionados no afecta la integridad de los datos presentados. ^[25]

Introducción

La minería ha sido una actividad de gran relevancia para la economía en México desde tiempos precolombinos; como evidencia podemos observar la Figura 1, que nos muestra el gran potencial con el que cuenta el territorio mexicano, ya que como se puede observar, su riqueza en yacimientos es grande en diversos metales entre los que destacan el cobre, molibdeno, oro, plomo y plata los cuales han sido empleados como objetos de trueque, ornamental o religioso durante la historia y no se pueden negar sus aplicaciones industriales en la era moderna.

Figura 1

Panorama Minero del Estado de Sonora [24]



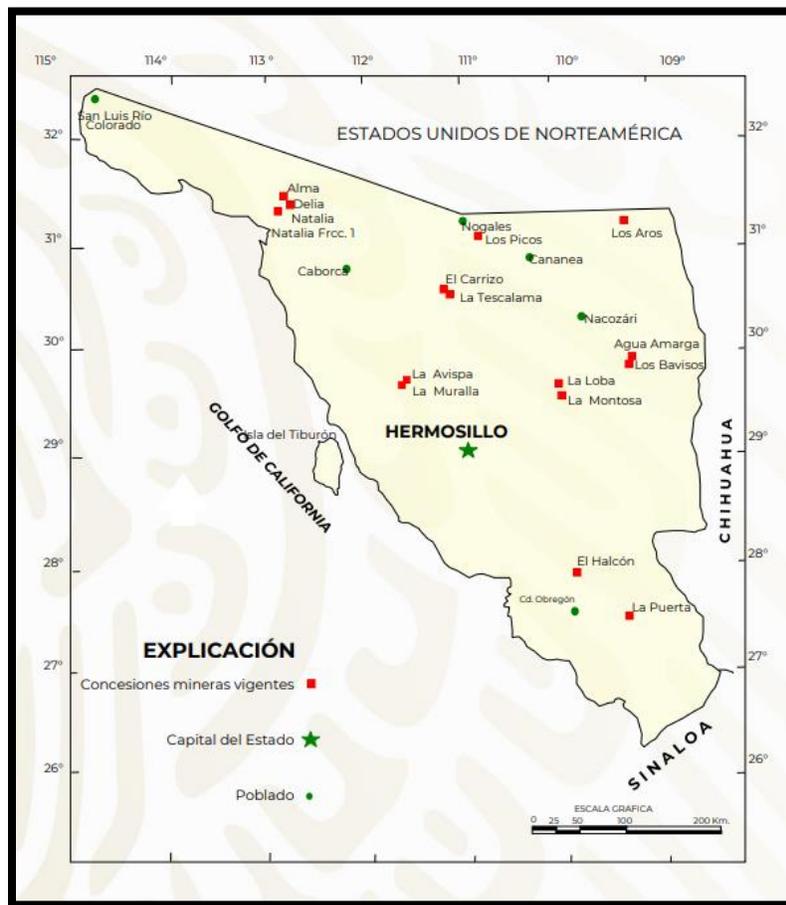
No se puede subestimar la influencia económica de la minería en México. Esta va más allá de las minas y su valor intrínseco y comercial hasta la generación de empleos indirectos en sectores como transporte, manufactura y construcción. [1]

Sonora, el tesoro minero por excelencia, ha cautivado durante generaciones con su diversidad de recursos minerales, abarcando tanto metales preciosos como minerales no metálicos. Aquí, en este vasto territorio, se encuentran los yacimientos más valiosos de cobre, molibdeno, oro y próximamente litio, en todo el país.

Pero eso no es todo, también guarda yacimientos minerales no metálicos, como el grafito, wollastonita y barita. Es por esto que, se ha ganado el primer lugar como productor minero en México durante años, todo gracias a dos gigantes mineros: Cananea y La Caridad, establecida en la región de Nacozeni de García, cuyas ubicaciones en el estado las podemos apreciar en la Figura 2. [2]

Figura 2

Concesiones mineras del estado de Sonora [24]



Los metales preciosos han adquirido mucho protagonismo, sobre todo en el ámbito industrial. Estos se emplean en muchas ramas como la catálisis, la biotecnología, la nanociencia y otras ramas, descubriendo nuevos usos para ellos. Pero a pesar de la cantidad que se extrae diariamente de los yacimientos disponibles en el mundo, la demanda supera en gran medida la cantidad de metales preciosos extraídos, es decir, la oferta que hay de los mismos, lo que plantea un desafío monumental; y sumando el hecho de que los metales del grupo platino se asocian químicamente a distintos minerales con enlaces muy fuertes, hace que la extracción del metal sea cada vez más compleja, necesitando varios pasos para obtenerlo en su estado más puro. ^[4]^[5]

En la interesante búsqueda de recuperación de metales preciosos, nos enfrentamos a un escenario en constante movimiento y cambio. La complejidad nos obliga a explorar un sinnúmero de técnicas y probar diferentes enfoques para optimizar la recuperación, cuyos métodos van desde el beneficio de minerales, la pirometalurgia y la hidrometalurgia. El beneficio de minerales abarca una amplia gama de técnicas físicas que buscan aumentar el contenido de metales valiosos en la mena. Por su parte, la pirometalurgia nos sumerge en un mundo de procesos físico-químicos a altas temperaturas para obtener los metales deseados. Mientras tanto, la hidrometalurgia se enfoca en procesos químicos que ocurren en presencia de fases acuosas a baja temperatura, con el mismo objetivo en mente. ^[4]^[5]

En este sentido, Metalúrgica de Cobre S.A. de C.V., parte del consorcio de Grupo México, destaca como una de las principales empresas en el ámbito de la recuperación de metales. Su objetivo principal es la extracción, procesamiento y refinación del cobre. De hecho, a través del proceso de electro refinación de cobre, se obtiene un residuo conocido como lodo anódico, el cual se convierte en la materia prima principal para el desarrollo del proceso en la planta de metales preciosos. Esta planta se encarga de la recuperación y producción de oro, plata, selenio y telurio, así como de un subproducto denominado concentrado de metales preciosos. Este concentrado sólido cuenta con una importante concentración de paladio y platino, considerados impurezas en el proceso de refinación del oro. ^[4]^[5]

Debido a la rareza de estos metales existe poca información sobre los métodos más eficientes para su recuperación, por lo que este estudio permitirá generar un procedimiento específico para la obtención de paladio y platino a partir del concentrado de metales preciosos.

En el desarrollo de este escrito se analizarán las metodologías aplicadas en las diferentes etapas de refinación de paladio (Pd), basando su transcurso en eficientar procedimientos ya establecidos, así como la implementación de métodos complementarios fundamentados en pruebas experimentales.

Justificación

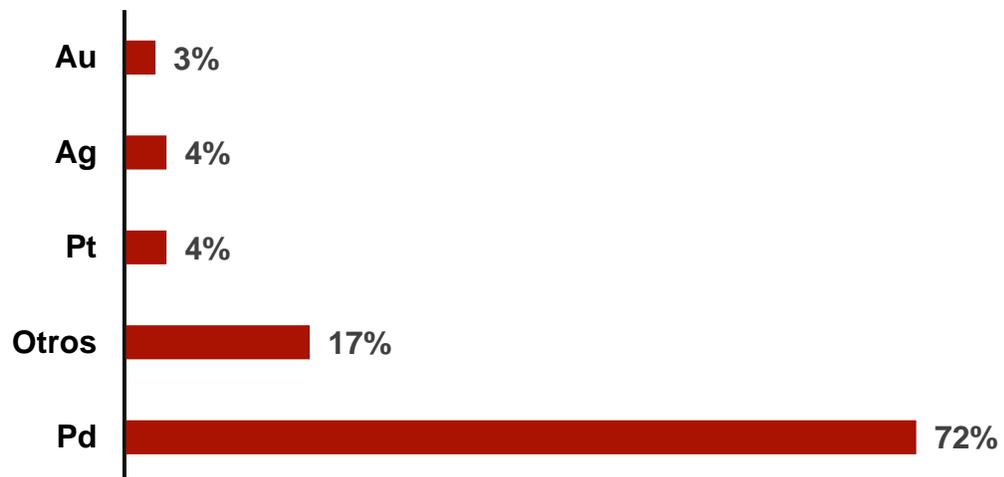
El uso de catalizadores en los vehículos está contribuyendo a la reducción de las emisiones contaminantes, como el CO, los HC y los NOx, en los escapes de los automóviles. Esto está teniendo un impacto sustancial en la calidad del aire. Este avance se traduce en beneficios ambientales importantes.

Los catalizadores automotrices están compuestos por recubrimientos de cerámica de alúmina o cordierita, que contienen aproximadamente 2 gramos de elementos del grupo de platino (EGP), como platino, paladio y rodio, en diferentes proporciones. La creciente demanda de estos metales, que son escasos en la naturaleza, ha generado un retorno de inversión considerable.^[6]

En Metalúrgica de Cobre, se utilizan los residuos de refinación de oro para producir un valioso subproducto llamado concentrado de metales preciosos, el cual contiene altas cantidades de paladio, platino, rodio, oro, plata e iridio, cuyos porcentajes podemos encontrar en la Figura 3, y como ya se mencionó, estos materiales cuentan con extrema demanda para la fabricación de catalizadores automotrices.

Figura 3

Composición de concentrado de metales preciosos calcinado



Por lo tanto, la extracción de estos metales preciosos de los remanentes de refinación del oro contribuye a satisfacer la demanda de estos elementos esenciales y al mismo tiempo que se aprovecha de manera eficiente un subproducto valioso.

Con el fin de recuperar y comercializar estos metales, se lleva a cabo un procedimiento que parte de la extracción selectiva de los mismos. Se realizan prácticas experimentales de refinación para obtener precipitados de platino y paladio mediante operaciones unitarias de reducción de volumen, aislamiento, extracción y purificación. El enfoque prioritario en esta etapa del proyecto se centra en la metodología de refinación del paladio debido a la baja concentración de platino en el concentrado de metales preciosos asignado para las pruebas.

El concentrado de metales preciosos atraviesa diversas etapas, desde la reducción de volumen mediante una calcinación del sólido hasta la disolución de los elementos por lixiviación con un disolvente ácido. Posteriormente, se lleva a cabo la purificación de la solución con la precipitación selectiva de oro y platino. El resultado de este proceso es una solución ácida altamente concentrada en paladio y con una mínima cantidad de impurezas que se buscan separar mediante un ajuste de pH que las lleve a precipitar.

En este punto, se inicia el desarrollo del plan de acción para tratar las impurezas de mayor presencia en la solución ácida. Además, se debe abordar la problemática de la cristalización de los componentes de paladio que se derivó en un producto sólido e inerte. Para ello, se llevarán a cabo pruebas para su redisolución y obtener así una solución madre para las siguientes etapas del proyecto.

En resumen, el reporte técnico se enfoca en la metodología de refinación del paladio y en la resolución de las problemáticas que surgieron durante el proceso de recuperación de los metales preciosos. Este informe es esencial para documentar los procedimientos utilizados y los resultados obtenidos, y permitirá mejorar la eficiencia del proceso de refinación en el futuro.

Planteamiento del problema

De acuerdo con la información anterior para delimitar el problema de investigación se debe tener en cuenta que:

- En la minería de metales del grupo platino, la mayoría de las menas contienen una mezcla compleja de materiales, incluyendo elementos de poco valor comercial. Durante el proceso de refinación, estos materiales interferirán en la purificación, lo que presenta un desafío para la recuperación efectiva de los metales del grupo platino.
- El agua regia es el reactivo principal utilizado en las primeras etapas de la lixiviación de los metales del grupo platino, pero esta mezcla de ácidos no cuenta con selectividad. Esto significa que puede disolver otros materiales en la mezcla, lo que dificulta la extracción selectiva de los metales del grupo platino.
- Para lograr una recuperación eficiente de los metales del grupo platino, es necesario aplicar pretratamientos pirometalúrgicos al material de la mena antes de la exposición. Estos pretratamientos pueden ser costosos y complicados, lo que presenta un obstáculo para la recuperación efectiva de los metales.
- La naturaleza inerte de los metales del grupo platino y su resistencia a la extracción selectiva obligan a la aplicación de procedimientos complejos y específicos en su recuperación. Esto implica la necesidad de recurrir a procesos más elaborados y específicos para lograr una recuperación efectiva.
- Aunque no se conoce con claridad la cinética del proceso general, se sabe que el tiempo de procesamiento puede variar de horas a días, dependiendo de las condiciones y la etapa específica del procedimiento. Esta variabilidad en el

tiempo de procesamiento puede afectar la eficiencia y la rentabilidad de la recuperación de los metales del grupo platino.

- La mayoría de los procesos para la refinación de metales preciosos se realizan bajo condiciones de presión y/o temperaturas elevadas, en presencia de agua regia u otros reactivos riesgosos para el ser humano. Esto representa un riesgo para la salud y la seguridad del personal que trabaja en el proceso de refinación.

Alcances

Corto plazo:

Formar un criterio más vasto sobre las propiedades, características y comportamiento de los MGP, específicamente del paladio, lo que nos permitirá aprender sobre su curso de obtención y su naturaleza; y de este modo, formular hipótesis acertadas para la implementación de procedimientos para la optimización de la metodología actual de producción de paladio

Mediano plazo:

Profundizar en los procesos implicados en la producción de paladio y desarrollar metodologías experimentales de fácil integración a las distintas etapas del procedimiento, que proporcionen información sobre sus posibles implicaciones en el proceso general de recuperación de paladio de alta pureza.

Largo plazo:

Una vez asimilado las repercusiones y resultados de la integración de procedimientos experimentales para la optimización del proceso general, emprender un estudio puntual sobre la trazabilidad y concentración de cada uno de los MGP presentes en el concentrado de metales preciosos, e implementar una extracción y refinación selectiva de cada uno sustentado por experiencia adquirida en procedimientos previos.

Objetivo del proyecto

Optimizar la metodología actual de producción de paladio, desarrollada en la planta de metales preciosos de Metalúrgica del Cobre, que permita elevar la pureza del producto en su forma metálica.

Marco teórico

1.1 Descripción del área de desarrollo del proyecto

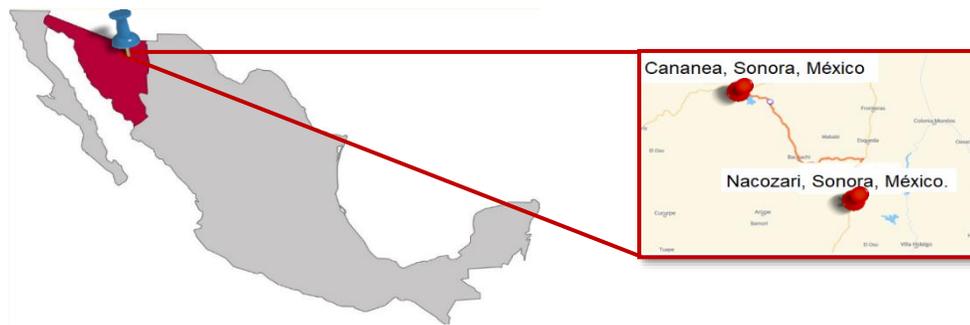
1.1.1 Antecedentes históricos

Con una trayectoria de más de cuatro décadas, Grupo México ha liderado el sector con su producción de cobre, su experiencia en transporte y su destacada implicación en construcción de infraestructura. Desde su fundación en 1978 por José Ángel Gutiérrez Contreras y Germán Larrea Mota Velasco, este grupo audaz ha forjado un camino hacia el éxito global, expandiendo su presencia en México, Perú, Estados Unidos, Argentina, Chile, Ecuador y España.

En un giro interesante, esta empresa se levantó tras la declarada bancarrota de la compañía minera estatal en la era de Carlos Salinas. Fue entonces cuando Larrea tomó la iniciativa y adquirió minas estratégicas en Cananea y Nacozari, situadas a una asombrosa distancia de 139 km una de la otra, tal como se revela en la Figura 4.

Figura 4

Ubicaciones mineras iniciales de Grupo México



En junio de 1979, marcó el inicio de las operaciones de la planta concentradora. Diseñada con una capacidad de 72,000 toneladas métricas diarias, su objetivo era abastecer la planta de fundición y mantener un ciclo de trabajo rentable. Sin embargo, la historia no se detuvo allí.

En 1985, un impulso innovador se apoderó de la planta fundidora al aumentar su capacidad a 90,000 toneladas. ¿Cómo se logró esto? A través de la automatización del proceso de trituración y molienda. Esta transformación dinámica impulsó aún más el potencial de producción y sentó las bases para un futuro aún más prometedor.

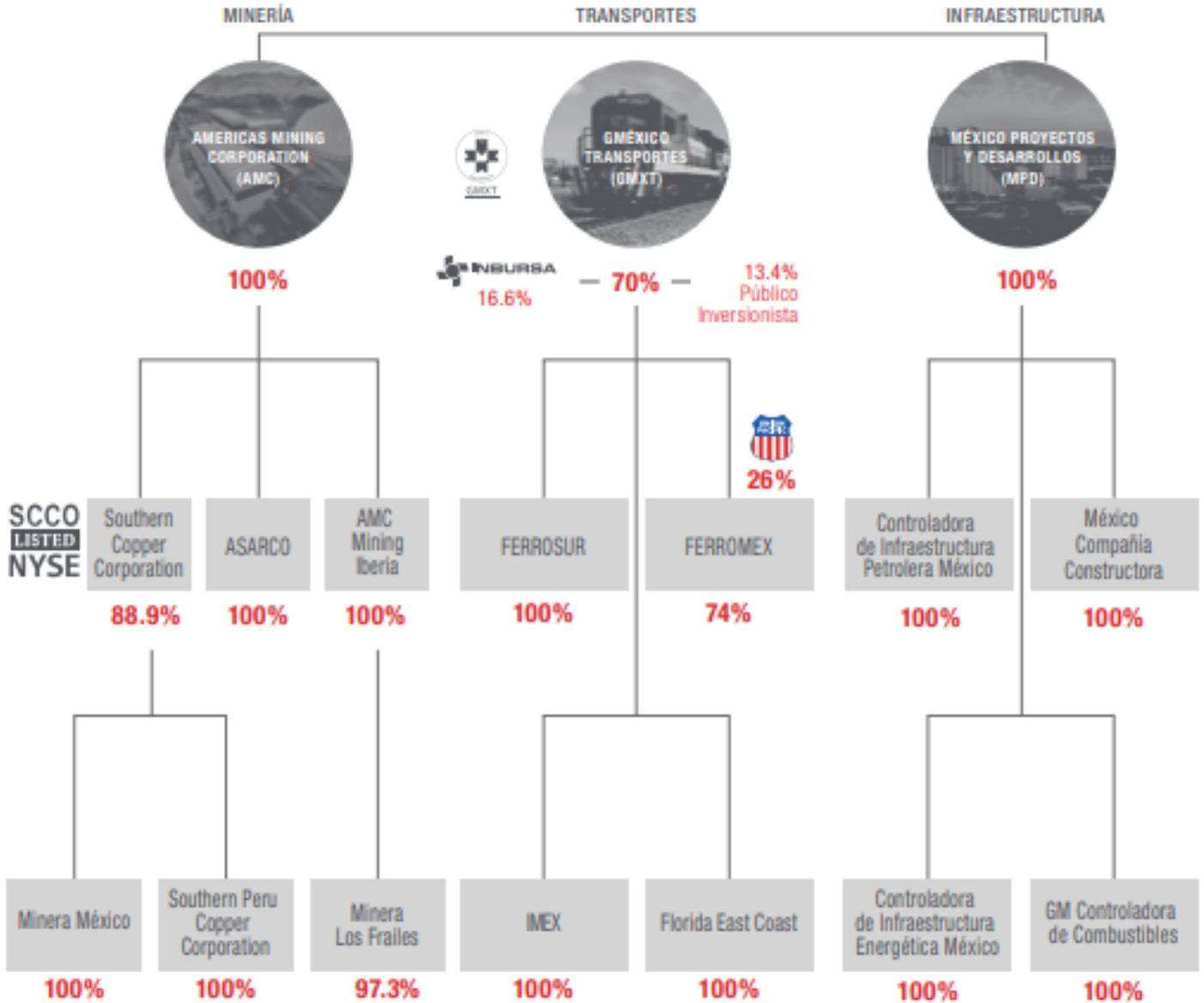
En el año 1998, Grupo México inició su travesía al inaugurar la Planta de Alambrón, un hito que marcaría el inicio de su vertiginoso ascenso. Posteriormente, en el año siguiente, expandieron aún más su dominio con la implementación de la innovadora Planta de Metales Preciosos. Y para el año 2000, ya ostentaban con orgullo el control del 87,5% de la producción de cobre en México, afianzándose como una fuerza imponente a nivel mundial en esta industria.

Sin embargo, la visión de Grupo México fue más allá. En el año 2004, se adueñaron de la gran mayoría de las acciones de la célebre Southern Perú Copper Corporation, adquiriendo con determinación un 54,2% de los títulos previamente en manos de la reconocida Corporación ASARCO LLC, una potencia minera con sede en Estados Unidos. Este audaz movimiento estratégico no solo evidencia el avance inquebrantable y la consolidación de Grupo México en el mundo de la minería, sino también su vasta experiencia en la ejecución triunfal de grandes proyectos.

Con cada paso, Grupo México desafía los límites establecidos y se alza como un actor imprescindible en la industria. Su legado es una prueba viviente de su insaciable sed de éxito y su indomable determinación para conquistar nuevos horizontes.^[7] Actualmente cuenta con las siguientes filiales, como se muestra en la Figura 5:

Figura 5

Estructura corporativa de Grupo México [7]



1.2 Proceso general de Metalúrgica de Cobre

Como su nombre lo indica, Metalúrgica de Cobre tiene el objetivo primordial y general de recuperar y refinar el codiciado metal: cobre (Cu). Este metal, cuyo valor se ha logrado mantener a través de los años, cuenta con un papel fundamental en la producción de una gran gama de productos que utilizamos diariamente, por lo que su importancia es innegable.

Grupo México lideró en 2015 la producción de cátodos electro refinados en México, con una participación de 70%, seguido por Peñoles, 12%, y Cobre del Mayo, 11%. ^[8]

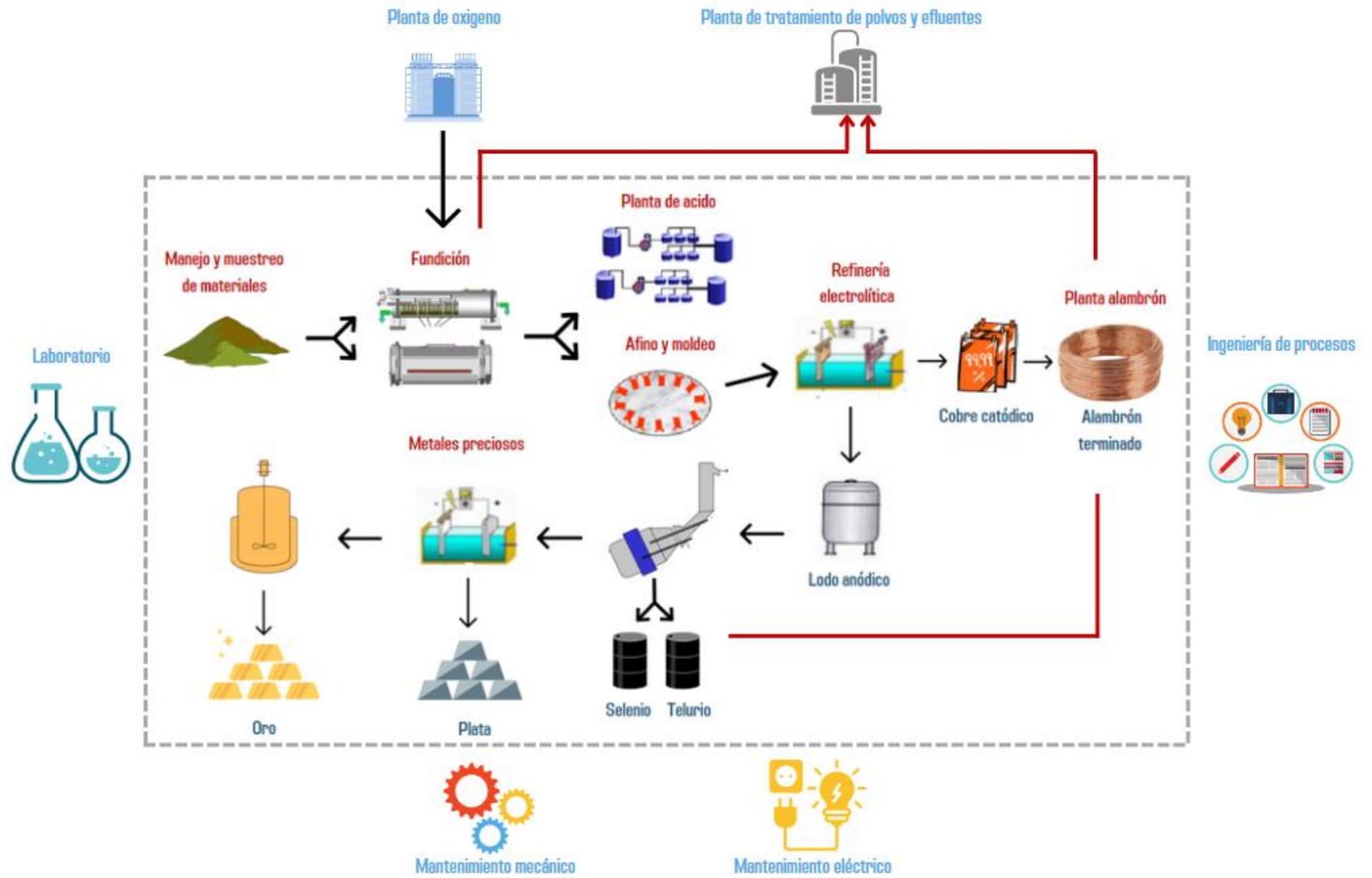
El cobre pasa por una serie de procesos que eliminan impurezas para obtener un metal de alta pureza. Estos procesos pueden incluir fundición, en la que se somete el mineral a altas temperaturas junto con otros materiales, lo cual da como resultado el denominado "Mate".

Pero el camino hacia la meta de alcanzar un terminado lo más limpio posible, no termina ahí. Para alcanzar la máxima pureza, el cobre sufre una metamorfosis adicional a través del proceso de refinado. Aquí es donde entran en juego técnicas sofisticadas como la electrólisis, en la que la electricidad se convierte en el medio capaz de separar el codiciado cobre de sus compañeros metálicos, lo que nos ofrece como terminado, un producto de una pureza de 99.99%.

La producción de cobre es una tarea compleja que requiere varias etapas desde la extracción del mineral hasta el resultado final de un metal refinado. Estas etapas a partir del concentrado de cobre se grafican en la Figura 6.

Figura 6

Proceso general de obtención de cobre (MetCob)



A continuación, se detallan las etapas y áreas en las que se desarrollan los procesos de producción del cobre hasta la obtención del concentrado de metales preciosos, el cual constituye la materia prima de este proyecto.

i. Extracción

El proceso puede hacerse de forma subterránea o a tajo abierto. En esta fase se suele realizar el minado, tras lo cual las piedras se trasladan a plantas donde son procesadas.

ii. Procesamiento del mineral

Las rocas que se han obtenido en la fase de extracción deben reducir su tamaño para liberar las partículas metálicas que contienen. Esto se realiza en las plantas concentradoras a través de métodos físicos y químicos. Los pasos del procesamiento del cobre son:

- **Molienda:** El mineral chancado se mezcla con agua para ser procesado en los molinos hasta hacerse polvo.
- **Flotación:** Permite separar los sulfuros de cobre del resto de las especies minerales.

iii. Manejo y muestreo de materiales

Área encargada de la recepción de concentrado de cobre principalmente, entre otras materias primas, procedentes de las minas La caridad, Buena vista del cobre, etc. y realiza el muestreo de estos en camas, acondicionando la materia prima para las posteriores etapas. Por otro lado, se encarga del proceso de recirculantes y el embarque de productos terminados.

iv. Fundición

La pirometalurgia es la rama de la metalurgia que se encarga de la obtención y purificación de los metales, a través de calor (hornos). Este proceso aplicado específicamente en la refinación del cobre depende de que el mineral compuesto se presente como sulfuro.

De las fases consecutivas de la fundición, la fusión y la conversión son determinantes por la importancia que tienen en el proceso general.

- La fusión se encarga de concentrar el metal a recuperar, por medio de una separación de las fases de alta temperatura: «una sulfurada rica en el metal» y otra «oxidada o pobre en el mismo».
- La conversión se encarga de eliminar el azufre y el hierro presentes en la fase sulfurada, mediante oxidaciones del baño fundido para obtener un cobre final relativamente puro.

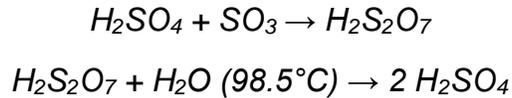
El objetivo de la etapa de fundición es la de transformar el cobre contenido en los concentrados, precipitados y minerales de fundición directa, en cobre metálico y separarlo de otros metales y minerales que constituyan impurezas.

Esta etapa se divide en varios subprocesos que van refinando el cobre hasta llegar a la pureza deseada. La fusión primaria del concentrado se lleva en dos hornos diferentes: 1) horno de fusión instantánea (HFI) 2) convertidor teniente (CT); en ambos casos se forman dos fases una metálica y una escoria. Las escorias son tratadas en los hornos eléctricos (HE) con el fin de recuperar una mayor cantidad de cobre. La fase metálica del HFI, CT y HE son enviadas a los convertidores Peirce Smith (CPS) para eliminar el hierro y el azufre hasta obtener un cobre blíster con 98.5% el cual es enviado al área de afino y moldeo para generar ánodos de 99.4%; la etapa de reducción del nivel de oxígeno presente en el baño fundido se realiza mediante la inyección de gas natural fraccionado con vapor de aire. Así se obtiene cobre anódico con un contenido de cobre de un 99,6%, el cual se extrae del horno de ánodos por una canaleta cubierta, a la rueda de moldeo para solidificación por reducción de temperaturas.

v. Plantas de ácido

Plantas cuyo objetivo principal es tratar los gases (SO_2) que se generan durante la fundición de concentrados de cobre y así generar ácido sulfúrico para el aprovechamiento de mismo como subproducto. Ambas plantas cuentan con tres etapas principales:

- Acondicionamiento del gas: Limpiarlo y bajar su temperatura
- Conversión: Transformar SO₂ a SO₃
- Absorción: Absorber el SO₃ y producir H₂SO₄



vi. Planta de polvos y efluentes

Trata los polvos que salen en las corrientes de gases obteniendo un concentrado de cobre para su reproceso y recuperación, y sulfato de plomo como producto final. Además de sedimentar los polvos que contiene el ácido débil generado en planta de ácido el cual es enviado a terreros.

vii. Planta de oxígeno

Suministra oxígeno con una pureza entre 96-98% al área de fundición (HFI, CT, CPS) para obtener esta pureza se llevan a cabo dos etapas:

- Acondicionamiento: 1) la compresión de aire 2) el preenfriamiento y 3) la remoción de humedad y dióxido de carbono (tamices moleculares).
- Destilación: se realiza un segundo enfriamiento y la separación del nitrógeno del oxígeno en una columna destilación aprovechando las diferentes temperaturas de condensación de estos elementos (oxígeno -183 °C y nitrógeno -193 °C).

Refinería electrolítica

Se obtiene cátodos de cobre con una pureza 99.999 a partir de electro refinación de los ánodos provenientes de fusión y moldeo. El proceso consiste en la aplicación de una corriente que permita la oxidación de cobre en el electrolito de ácido sulfúrico y su posterior reducción en la superficie del cátodo de acero inoxidable. Dentro de este proceso los parámetros de operación que se deben cuidar son la concentración de cobre, de ácido y de aditivos orgánicos en el electrolito, así como el flujo del electrolito, temperatura y la densidad de corriente aplicada.

Durante el proceso de electro-refinación del cobre se generan lodos anódicos con contenido de oro, plata, metales del grupo del platino, selenio, telurio y cobre. Estos lodos son enviados a un proceso de lixiviación en autoclaves para remover el cobre y obtener un lodo decobrizado que después es tratado para recuperar los metales preciosos contenidos en el lodo. Además del cobre también se lixivian otros elementos como el telurio, por lo que esta solución rica en cobre es purgada del proceso hacia ESDE.

viii. Alambrón

Producción de alambrón de 8 mm mediante fusión a partir de cátodos de cobre provenientes de la refinería electrolítica de cobre.

ix. Servicios auxiliares

Provee los servicios de energía, aire y agua a las diferentes áreas del complejo metalúrgico. Se divide en tres subáreas:

x. Control de calidad

Laboratorios especializados para realizar análisis químicos y físicos de materia prima, producto terminado y material interno del proceso. Como muestras más importantes se tiene el concentrado, cátodo, ánodo, alambrón, ácido sulfúrico, mata y escoria. Ingeniería y control de proceso: tiene presencia en fundición, plantas de ácido, equipo de proceso, refinería electrolítica, alambrón y metales preciosos. Esta área es responsable realizar mediciones, inventarios, generar un plan anual y pronósticos mensuales, así como de dar seguimiento trazabilidad al cobre.

xi. Planta de metales preciosos

Se recupera plata, oro, selenio y telurio a partir del tratamiento de lodos anódicos, subproducto de la refinación electrolítica de cobre, el proceso general se describirá con más detalle en el siguiente apartado.

2 Planta de metales preciosos

La Planta de Metales Preciosos representa una etapa crucial en la recuperación de elementos como la plata, el oro, el selenio y el telurio, a partir de los lodos anódicos provenientes de la refinación electrolítica de cobre. Estos lodos son considerados residuos del proceso de electro refinación de cobre y su tratamiento efectivo resulta en la obtención de metales valiosos.

Los metales preciosos son elementos naturales de alto valor monetario, caracterizados por su baja proporción en la corteza terrestre y por pertenecer al grupo de metales nobles. Este último concepto se refiere a metales que son inertes químicamente, y altamente resistentes a la oxidación y al ataque de ácidos, lo que les permite mantener su brillo y pureza por largos períodos de tiempo.

Estos metales son:



Como ya se mencionó, la principal propiedad de los metales preciosos es que son muy escasos en la corteza terrestre, por lo que su extracción y costos finales suelen ser muy elevados. Su precio es muy superior al de otros elementos metálicos como el hierro y el aluminio, presentes en todo el planeta y de propiedades más básicas.

El siguiente cuadro presenta los metales preciosos clasificados según su valor actual en el mercado internacional (valor sujeto a cambios). La abundancia reportada de cada uno de estos elementos en la corteza terrestre también se expresa en partes por millón (ppm), lo que representa miligramos del mineral presente por kilogramo de corteza, lo que evidencia la escasa presencia de los metales preciosos en nuestro planeta. ^[13]

Tabla 1

Clasificación de metales preciosos ^[13]

Metal	Símbolo	NA	Densidad (g/cm³)	Abundancia en la corteza (ppm)
Osmio	Os	76	22.58	0.0001-0.0018
Rodio	Rh	45	12.40	0.0002-0.0007
Iridio	Ir	77	22.56	0.0003-0.0004
Paladio	Pd	46	12.00	0.0006-0.0063
Oro	Au	79	19.30	0.001-0.0031
Platino	Pt	78	21.50	0.0030-0.0037
Rutenio	Ru	44	12.10	0.0010
Renio	Re	75	20.80	0.0004-0.0026
Plata	Ag	47	10.50	0.0700-0.0800

2.1 Generalidades de los metales preciosos

Osmio

Es importante destacar que es el metal precioso más valioso y el elemento natural más denso de la tabla periódica. Además, es uno de los metales más duros y quebradizos. Se encuentra principalmente en depósitos minerales en el continente americano y Rusia.

Rodio

Es otro metal precioso, de color plateado y extremadamente reflectivo. Posee una densidad intermedia comparada con la de los más pesados y un punto de fusión relativamente alto. Es utilizado como recubrimiento en la manufactura de espejos de alta calidad debido a su propiedad de reflejar la luz.

Iridio

Es un metal de transición plateado del mismo grupo que el rodio. Posee un punto de fusión de 2446°C y es el material más resistente a la corrosión que se conoce, además del segundo elemento más denso de la tabla periódica.

Paladio

El paladio es de color plateado y posee una densidad comparable a la del rodio. Este metal precioso se caracteriza por ser un buen catalizador para una gran variedad de reacciones químicas orgánicas e inorgánicas, por lo que la mayor parte del paladio producido a nivel mundial se emplea en la fabricación de convertidores catalíticos para la eliminación de gases contaminantes en los escapes de los automóviles de combustión interna.

Oro

El oro es sin duda el metal precioso más conocido y es el primero en saltar a la mente cuando se menciona dicho término. Es un metal denso, muy blando y maleable y, además, es uno de los mejores conductores térmicos y eléctricos que se conoce. Es un metal noble que no se oxida y que es resistente a la mayoría de los ácidos. Su

característica más resaltante es su color amarillo característico y su brillo metálico que perdura en el tiempo.

Platino

El platino es otro de los metales preciosos mejor conocidos, principalmente por su uso en joyería como uno de los componentes del oro blanco. Sin embargo, al igual que el paladio, el platino posee propiedades catalíticas muy importantes, por lo que su uso principal es en los mencionados convertidores catalíticos, así como en la industria química para fomentar ciertas reacciones importantes.

Rutenio

Este metal de densidad intermedia y de gran resistencia a la corrosión se utiliza principalmente en la industria electrónica, aunque también se ha usado en forma de óxido como recubrimiento de electrodos para la síntesis electroquímica de cloro. Se utiliza también como componente de las aleaciones con platino denominadas oro blanco para la fabricación de joyas.

Plata

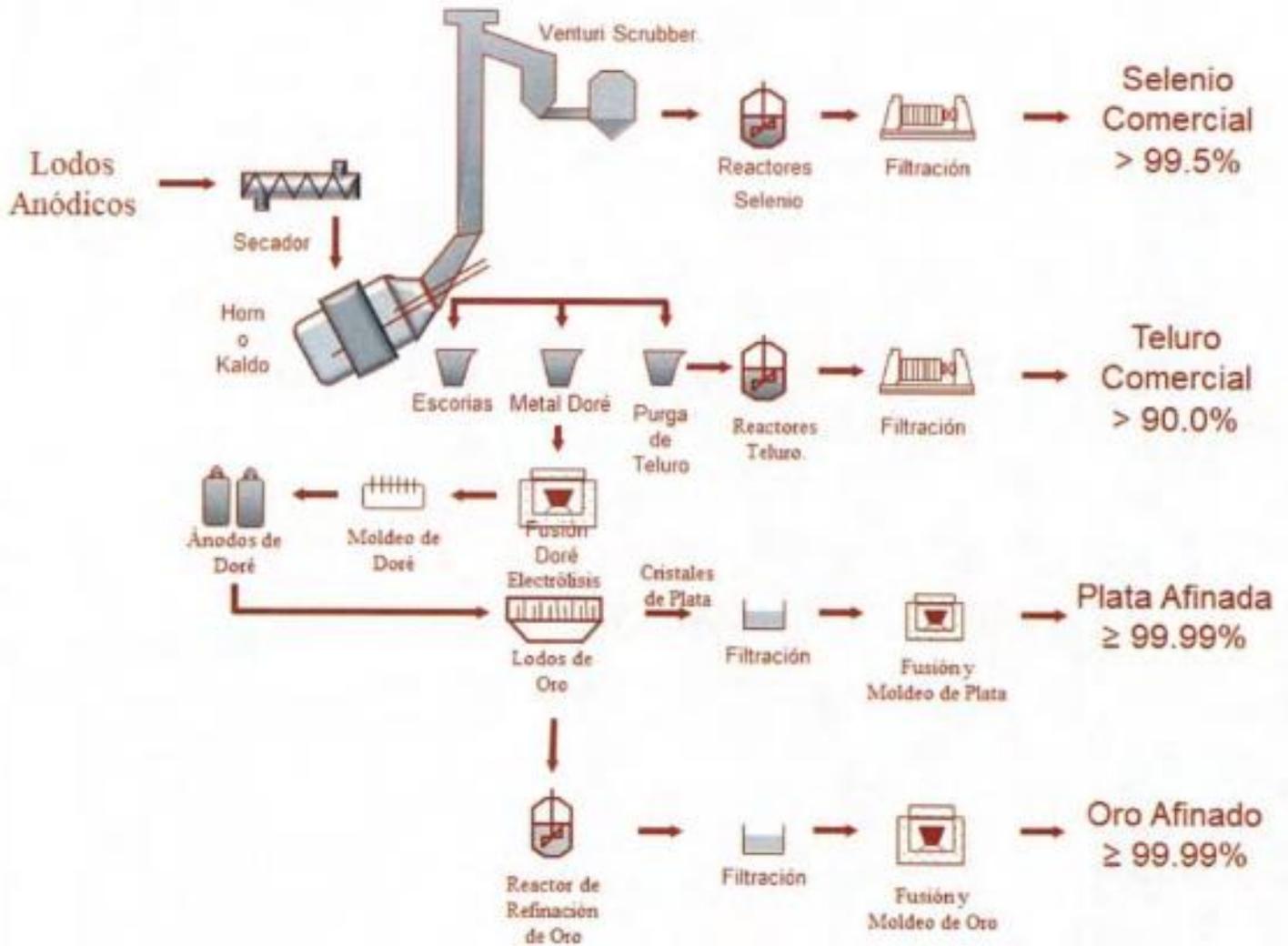
La plata es el segundo metal precioso más conocido desde la antigüedad. Junto con el oro y el cobre formaba parte de los medios de pago en distintos reinos e imperios, tales como el romano. La plata no clasifica generalmente como un metal noble, ya que tiende a oxidarse y adquirir una apariencia opaca, requiriendo ser pulido para restituir su brillo original.

2.2 Descripción de proceso

El presente proyecto se centra en la refinación de paladio y platino, por lo que se describirán cuáles son las etapas y procedimientos por los que pasan estos elementos hasta que su concentración nos haga posible su recuperación.

Figura 7

Proceso general de la planta de metales preciosos [14]



La recuperación de cada uno de los productos mencionados en la Figura 7, es el resultado de la ejecución de las siguientes etapas de proceso:

2.2.1 Tratamiento primario de lodos anódicos

El lodo anódico, es la materia prima por tratar en el área denominada como pirometalurgia, como su nombre lo indica en esta primera etapa el lodo recibe un primer tratamiento en un horno, con el fin de generar ánodos de dore para ser tratado en refinería de plata. Los lodos anódicos, cuyo análisis químico se muestra Tabla 2, generalmente están constituidos en su mayor parte por:

- Sulfato de plomo
- Seleniuros de cobre y plata.
- Sulfato de cobre.
- Cobre metálico.
- Arseniato de antimonio.
- Arseniato de bismuto.
- Óxidos de plomo, arsénico, antimonio, bismuto, y níquel.
- Arseniato de cobre.
- Arseniato de estaño.
- Sílice.
- Oro

Tabla 2

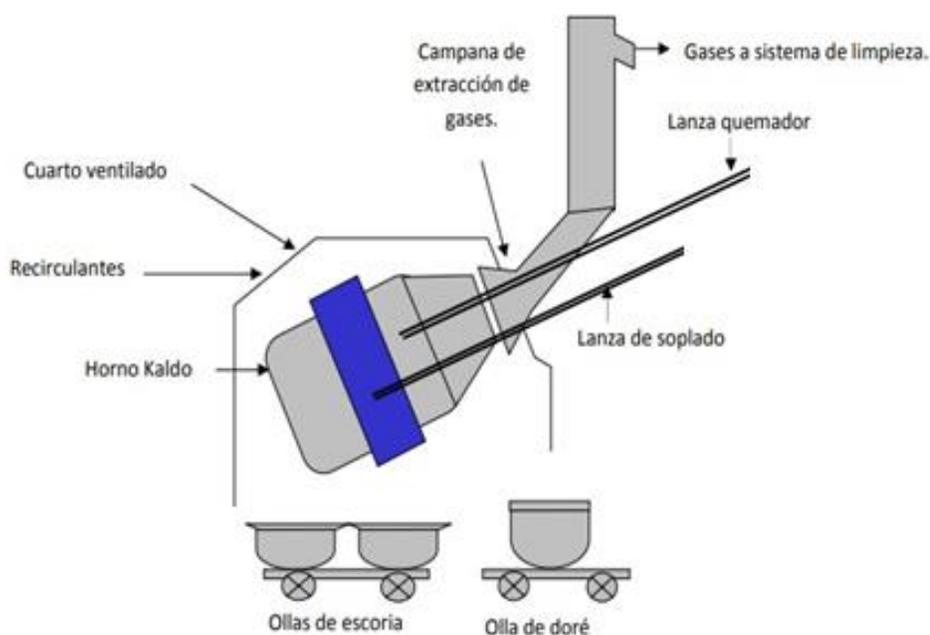
Composición de lodo anódico

Componentes	% en Peso	Peso molecular gr/mol	Punto de fusión °C	Punto de ebullición °C
Ag	20-28	108	961.8	2,162
Au	0.007	197	1064	2970
Pb	25.5	207	327.4	1725
Bi	2.2	209	271.5	1564
Sb	8.4	122	630.6	1587
Se	4.4	79	220.8	684
Te	0.55	128	449.5	987.8
Ba	1	137	727	1897
SiO₂	2.6	60	1710	2230
S	5.3	32	112.8	444
Cu	0.30	63	1085	2562
Pt	No detectable	195	1768	3825
Pd	No detectable	106	1555	2963

El proceso de fusión de lodos anódicos para la producción de metales preciosos a nivel industrial típicamente se realiza en un reactor rotatorio intermitente, denominado horno kaldo, horno tipo rotatorio de soplado superior. Este equipo brinda la ventaja de ejecutar las distintas etapas de fundir, reducir y convertir en un mismo reactor sin requerir recipientes por separado. El diagrama esquemático del mismo se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Esquema del horno kaldo para la producción de metal dore ^{[14][15]}



La materia prima es colocada en el interior del horno y es calentado por medio de una lanza quemador. El proceso consiste en las siguientes etapas consecutivas: sinterización, fusión, conversión, refinación y purgas de telurio. Al final de cada etapa, el reactor se deberá bascular con el fin de lograr la inclinación necesaria para el sangrado de escoria. Durante las etapas de conversión y refinación, adicionalmente a la lanza quemador se introduce una segunda lanza la cual inyecta aire comprimido al reactor para promover la eliminación de selenio del material fundido en forma de óxidos volátiles.

❖ Etapas del proceso ^[16]

Carga de recirculantes

- Plata cementada.
- Lodo Venturi.
- Escoria de conversión.
- Precipitados de selenio.
- Polvo de casa de sacos.

Sinterización

Calentamiento de la mezcla de polvos (carga y recirculantes) a una temperatura inferior al punto de fusión del metal base, lo que provocará la soldadura de las partículas de polvo entre sí, su propósito general es la reducción del volumen de la carga total la cual se divide entre cinco y seis cargas parciales, dependiendo de la carga total y de la capacidad volumétrica del horno kaldo.

Fusión

La temperatura de trabajo aumenta a 1150 °C posibilitando así la fusión de la carga, lo que posteriormente permitirá hacer uso de las diferencias de densidades entre sus componentes, y en consecuencia lograr una separación física de los metales de interés e impurezas.

Reducción/Escorificación

Durante la reducción, se realizan cargas de coque al reactor, con el fin de reducir la plata contenida en la escoria, a su fase metálica, una vez que el porcentaje de plata en la escoria formada se encuentre por debajo del plan de calidad se procede a vaciar o “sangrar” la escoria dentro de ollas de captación mediante el uso de rastras.

Conversión

Etapa en la que se promueve la eliminación de la mayor cantidad de plomo mediante la adición de un agente complejante y la creación de una atmosfera oxidante creado por la inyección directa de aire.

Refinación

Eliminación de las impurezas en el Doré, (Selenio y remanentes de plomo, entre otras) haciendo uso nuevamente de la oxidación mediante el accionamiento de la lanza de conversión, para la formación del $\text{SeO}_2(\text{g})$. En esta etapa se aumenta la temperatura a un rango de 1100-1150 °C.

Purgas de telurio

Extracción física de telurio mediante el uso de carbonato de sodio para formar telurito de sodio y extraerlo como escoria.

Moldeo de Doré

Moldear el Doré fundido en forma de ánodos para posteriormente transportarlo al área de electro refinación de plata.

Sistemas auxiliares para el tratamiento de los gases y polvos

a. Sistema de ventilación / Colector de polvos

Su objetivo principal es el captar los polvos fugitivos que se producen en las etapas de sinterización y fusión procedentes del Horno Kaldo.

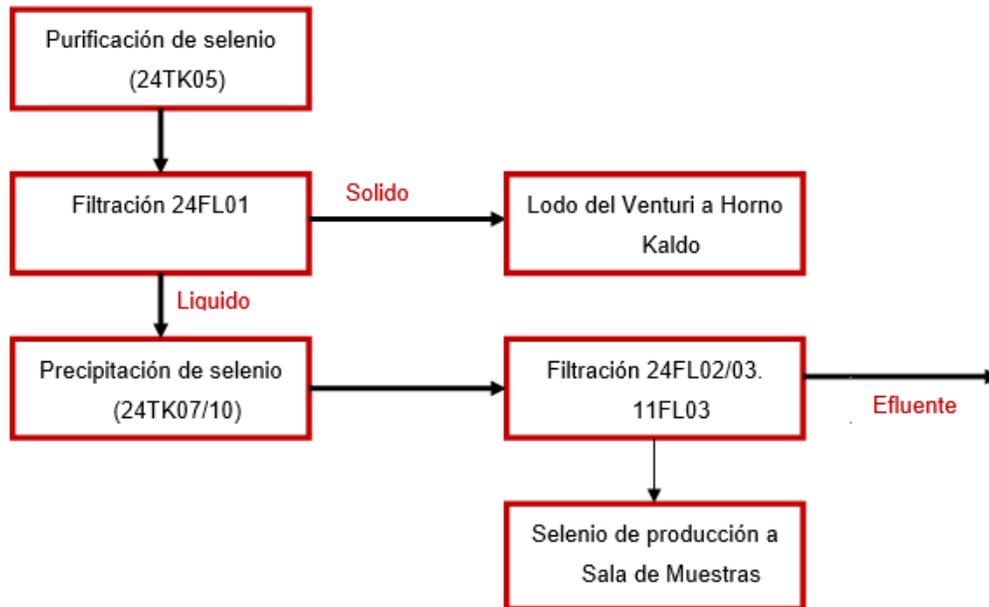
b. Limpieza de gases

El propósito general de la limpieza de gases es remover todos los contaminantes posibles de los gases que salen del proceso de fusión de dore anteriormente descrito, con el fin de propiciar un proceso más amigable con el medio ambiente, así como la recuperación de selenio.

2.2.2 Proceso de recuperación de selenio

Figura 9

Proceso general para la obtención de selenio ^[15]



Tanque de purificación y filtro de prensa del Venturi

Cuando la operación del horno Kaldo finaliza, la solución de recirculación contiene un promedio de 40 a 50 g/L de lodo, y de 20 a 40 g/L de Se.

La solución se descarga a un tanque de purificación en donde se filtra para la recuperación del residuo sólido el cual es enviado al proceso de fusión de lodos debido a que los contenidos del sólido son muy parecidos a los del lodo anódico. La solución filtrada que contiene el selenio pasa a un reactor donde se realizará su precipitación.

Precipitación de selenio

La solución rica en selenio es precipitada mediante la inyección de SO₂ (gas).



El selenio sólido es colectado en un filtro prensa, lavado, envasado y puesto a disposición para su venta, con una pureza $\geq 99.5\%$. El efluente se envía a tratamiento antes de su disposición final.

2.2.3 Electrodeposición de plata

Los ánodos de Doré se colocan en las celdas de electrolisis dentro de un filtro bolsa, en el cual se colectan los lodos anódicos, remanentes del proceso, se deberá tener mucho cuidado con los filtros bolsas al momento de colocar los ánodos.

Una vez que a la celda se le han colocado los 12 ánodos, se accionaran las válvulas para que las celdas sean llenadas con electrolito, que es este caso es Nitrato de Plata (AgNO_3).

Derivado de la electrolisis de Doré se obtiene un subproducto llamado lodo anódico, conocido internamente como **lodos de oro** por su alto contenido de este, utilizado como materia prima principal para la recuperación de oro y su estudio para la obtención de metales del grupo platino.

Los cristales de plata formados durante el procedimiento son recuperados y fundidos en un horno de inducción para su posterior moldeo y clasificación.

2.2.4 Refinación de oro

La refinería, como su nombre lo indica, es el área, lugar o planta donde se llevarán a cabo distintos procesos físicos y químicos, con la finalidad de eliminar todas las impurezas hasta dejar el oro en su estado más puro.

El proceso inicia con la incorporación de un lote de lodo de oro, conformado por el lodo de una sección de electrolisis de plata y continua con el proceso que se describe a continuación.

Homogenización

Mezclado de lodos de oro en agua, con el propósito de homogenizar su concentración para la toma de muestras representativas para su análisis químico y su posterior balance metalúrgico.

Purificación

Etapas en la que se pretende lixiviar en lo posible, el total de impurezas contenidas en los lodos de oro (Ag, Cu, Pd, Pt, Rh).

Lixiviación

Se carga el reactor de vidrio con agua, ácido clorhídrico y lodo purificado. Una vez lista la mezcla, el reactor se sella herméticamente y se comienza a agitar; a la solución se le inyectará paulatinamente Cl_2 (gas), para la formación de ácido cloro áurico.

Reacciones:



Precipitación

La solución clarificada se transporta a un reactor vidriado donde mediante un dosificador se le agregara el agente reductor para formar el precipitado de oro. En el primer Batch se precipita el 90% del oro y en el segundo Batch se precipita el resto, a los precipitados resultantes se les llaman arena I y arena II, los cuales se analizan para conocer su pureza.

Figura 10

Reactor de vidrio para precipitación de oro ^[15]



Moldeo de lingotes

Las arenas de oro recuperadas de las etapas de precipitación y lavado, las arenas son transportadas a un horno de fusión, donde se elevará la temperatura por encima de los 1064 °C y así obtener un producto líquido para su posterior moldeo y clasificación.

Tratamiento de efluentes.

Todos los efluentes líquidos de la sección pirometalúrgica son colectados para tratarse con hidróxido de sodio y carbonato de sodio para precipitar metales valiosos y cobre. El lodo se filtra y se envía a la fundición de cobre, el filtrado se bombea y se carga a pipas para su disposición en la presa de jales o en los terreros de la planta de extracción por solventes y deposición electrolítica (ESDE), según sea su concentración en acidez libre o basicidad.

3 Antecedentes del proyecto

3.1 Paladio

3.1.1 Generalidades

En el amplio mundo de la metalurgia, el paladio se distingue como un metal de inmensa importancia y abundancia, pues cuenta con características notoriamente similares a las del platino. Su apariencia blanca y su increíble ductilidad lo distinguen, pero lo que realmente lo eleva a otro nivel es su inigualable resistencia a la oxidación en contacto con el aire. Además, resulta asombroso constatar que este es el elemento perteneciente al grupo del platino con la menor densidad y punto de fusión.

El paladio goza de una excelente reputación debido a su habilidad innata para formar aleaciones con diversos metales, tales como el cobre, níquel, oro, iridio, rodio y rutenio. Estas aleaciones no solo aumentan su resistencia, sino también su dureza y fortaleza, superando ampliamente al paladio en su estado puro.

En el año 1803, el intrépido científico William Hyde Wollaston, una mente brillante en la física y la química hizo un increíble descubrimiento al conseguir separar a un elemento específico, el paladio (Pd). Fascinado por su potencial, Wollaston decidió rendir homenaje al asteroide Pallas al darle su nombre. No es sorprendente que, siendo un miembro del selecto grupo del platino, el paladio se encuentre constantemente entrelazado con otros metales nobles, como el rodio, el osmio, el rutenio e iridio, debido a las similitudes en sus propiedades químicas.

Ahora bien, adentrémonos en el cautivador proceso de obtención del paladio, un verdadero compendio de química y destreza. Wollaston, con su incansable ingenio, empleó una serie de intrincados pasos para extraer este metal a partir de otros minerales. En primer lugar, disolvió el mineral en una misteriosa sustancia llamada agua regia, para luego equilibrar su acidez excesiva mediante la intervención del hidróxido sódico.

Como siguiente paso, se generó un precipitado de platino utilizando cloruro de amónico. Sin embargo, el paladio siguió un camino diferente: adoptó la forma de un cianuro de paladio mediante un delicado tratamiento con cianuro mercúrico. Y, finalmente, el tan ansiado paladio metálico emergió de las profundidades del cianuro de paladio bajo el calor del fuego.^[17]

En resumen, el paladio es un metal de gran relevancia en la metalurgia, con propiedades y características similares a las del platino. Su extracción requiere de procesos químicos específicos, y su capacidad para formar aleaciones lo hace un material muy valorado en la industria.

I. Propiedades

Tabla 3

Especificaciones Fisicoquímicas	
Nombre	Paladio
Símbolo	Pd
Numero atómico	46
Periodo	5
Bloque	d
Configuración electrónica	[Kr] 4d ¹⁰
Radio iónico	0.50 (+2)
Energía de ionización	805 (kJ/mol)
Afinidad electrónica	54 (kJ/mol)
Mas atómica	106.42 g/mol
Grupo	10 (transición)
Números de Oxidación	+2, +4
Radio atómico	1.37 Å
Radio covalente	1.31 Å
Electronegatividad	2.20
Aspecto	Blanco-plateado metálico
Textura	Resistente a la corrosión
Densidad	12.02 g/cm ³
Punto de fusión	1555 °C
Punto de ebullición	3980 °C
Volumen atómico	8.85 cm ³ /mol
Dureza	4.5
Calor específico	244 J/(K·Kg)
Conductividad eléctrica	9.5 · 10 ⁶ S/m
Conductividad térmica	72 W / (m · K)

II. Usos y aplicaciones

Cuando se aborda desde una perspectiva metalúrgica, resulta imposible pasar por alto la destacada capacidad del paladio para entrelazarse con otros metales. Es como si su naturaleza inquieta buscara constantemente la compañía del cobre, níquel, oro, iridio, rodio y rutenio para formar aleaciones fascinantes. Estas alianzas metálicas exhiben un desempeño superior en términos de resistencia, dureza y fuerza, superando con creces las virtudes del paladio puro.

El paladio demuestra su versatilidad de aplicación en una variedad de campos, desde los convertidores catalíticos que reducen las emisiones tóxicas de vehículos hasta la exquisita joyería, la odontología, la meticulosa relojería y las tiras reactivas que controlan los niveles de azúcar en la sangre, el paladio se cataloga como un protagonista indiscutible. ^[17]

Incluso en el cielo, en las alturas donde las aeronaves desafían la gravedad, las bujías de aviones confían en su uso. Sin olvidar su papel en la creación de instrumentos quirúrgicos de precisión y contactos eléctricos vitales. Así, el paladio deja su huella en cada rincón de la industria. ^[17]

Este metal polifacético no solo conquista los ámbitos prácticos, sino también el dominio de las finanzas, pues se alza como uno de los cuatro metales sagrados con códigos en el estándar internacional ISO 4217. Oro, plata, platino y paladio, una selecta hermandad que establece su relevancia en el mundo económico. ^[17]

La importancia del paladio como material de uso industrial y su amplia gama de aplicaciones lo convierten en un material de interés para la investigación y el desarrollo. En este proyecto, se busca explorar nuevas formas mejorar sus propiedades y hacerlo aún más útil en diferentes aplicaciones. ^[17]

Información comercial

El paladio, es un metal de valor incalculable que pertenece al prestigioso grupo del platino y ha presenciado un crecimiento exponencial en su demanda en las últimas décadas. Tanto compradores privados como la industria automotriz han sucumbido a su irresistible atractivo. A pesar de haber sido descubierto en el siglo XIX, el paladio aún mantiene su esencia como un tesoro raro ypreciado, siendo aproximadamente 15 veces más escaso que su noble compañero, el platino.

Resulta crucial subrayar la dualidad de la demanda del paladio, pues tanto los compradores privados como la industria automotriz se rinden ante su valor. Sin embargo, su rareza es un desafío, ya que la oferta de paladio es limitada. ^[21]

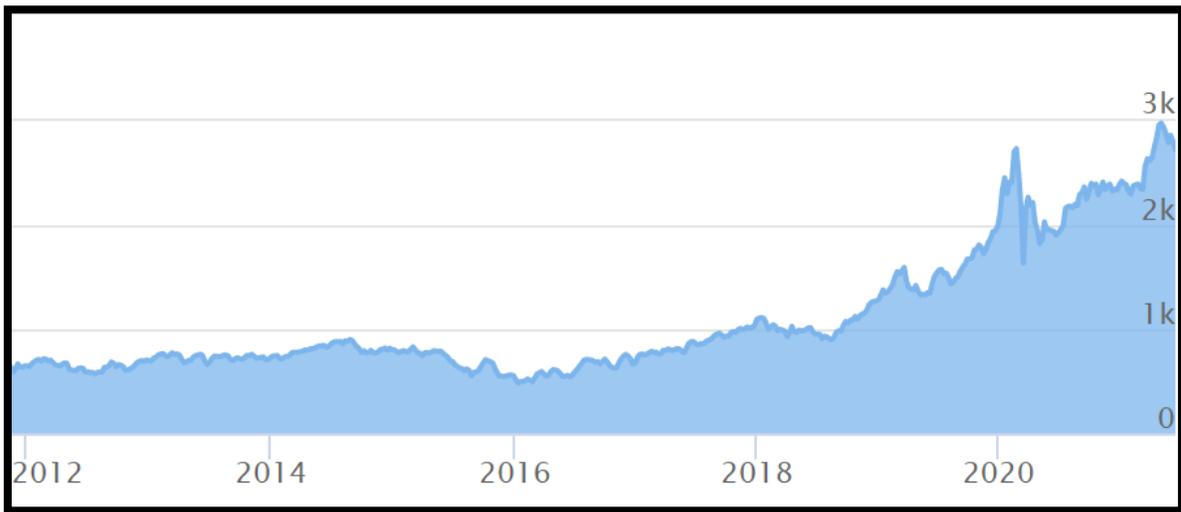
Desde la ruptura del caso Volkswagen, la demanda de paladio, un metal utilizado en la fabricación de convertidores catalíticos para automóviles a gasolina es fuerte.

El metal está cerca de su nivel histórico más alto. En los mercados de metales, que han sido golpeados por la escalada de la disputa comercial entre China y Estados Unidos, el paladio no ha sido afectado. A partir del año 2016 el ascenso en su precio ha sido descomunal, partiendo de un precio de \$481 USD/Oz en 2016, hasta alcanzar cifras récord de \$3,339 USD/Oz en 2022, es decir, 6.9 veces el valor inicial. ^[18] ^[19]

Este fenómeno se puede apreciar notablemente en la Figura 11, que se presenta a continuación.

Figura 11

Evolución del precio del paladio por USD\$/onza 2012-2021 ^[19]

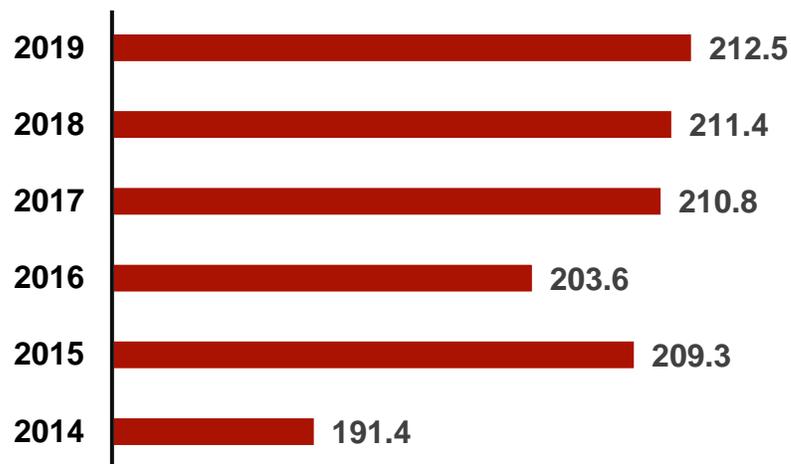


Producción

A pesar de su creciente demanda, la producción anual de paladio ha mantenido un promedio constante de 200 toneladas en los últimos 20 años, con pocos aumentos significativos, como se muestra en la Figura 12

Figura 12

Producción minera de paladio a nivel mundial [23]

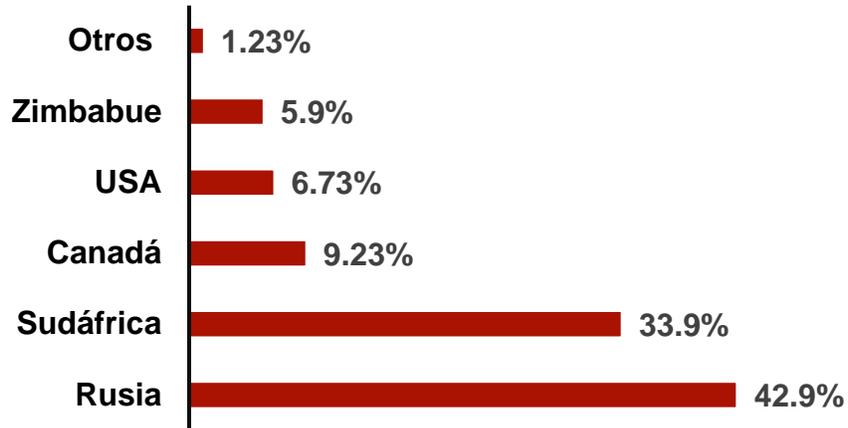


Nota. 1 Toneladas métricas

Los principales países productores de paladio son Rusia y Sudáfrica, que controlan cerca del 80% de la producción mundial. Sin embargo, otros países como Canadá, Estados Unidos y Zimbabue también tienen importantes minas de paladio. La distribución geográfica de los yacimientos de paladio, junto con su limitada producción, lo convierten en un recurso altamente valorado en los mercados internacionales, como se puede apreciar en la Figura 13.

Figura 13

Procedencia de la producción anual de paladio (Pd). [23]

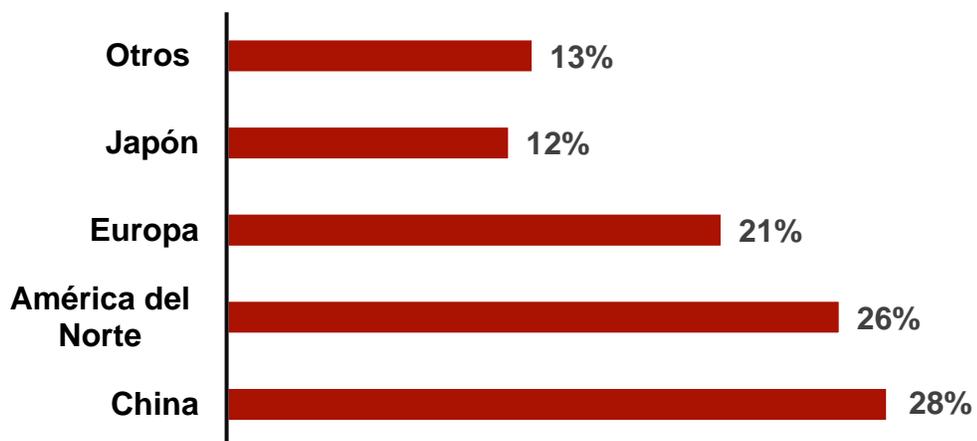


Consumo

En el informe anual de 2018 de la prestigiosa firma de análisis químicos Johnson Matthey, se reveló que la demanda del codiciado paladio había vivido un crecimiento vertiginoso. Un salto impresionante que llevó las cifras de 9,3 millones de onzas en 2016 a asombrosas 10,1 millones de onzas en 2018. En la Figura 14 podemos observar el consumo por país de este metal.^[23]

Figura 14

Consumo porcentual anual por país. [23]



Específicamente, el sector automotriz es el principal impulsor de esta demanda, donde la necesidad de paladio aumentó de 7,9 millones de onzas a 8,6 millones de onzas en tan solo dos años, siendo la principal aplicación de este metal en los catalizadores para automóviles. Estos datos indican que el paladio es un elemento clave en la industria automotriz y, por lo tanto, es un factor importante que considerar.^[22]

4 Proceso de recuperación de paladio y platino de la PMP (Metalúrgica de Cobre)

Metalúrgica de Cobre basa su proceso de recuperación y refinación de cobre en el procesamiento de concentrados provenientes de mina, en este punto, ya se ha podido racionalizar que la materia prima principal para el proceso general contiene valores altos y redituables en su concentración de cobre, pero también de otros metales de interés, como metales preciosos y los pertenecientes al grupo platino.

Dadas sus características intrínsecas, los metales del grupo platino (MGP) presentan una elevada estabilidad química, derivando en su capacidad de resistir a una serie de procesos físicos y químicos agresivos empleados en los distintos procesos implicados en cada una de las etapas del proceso general, lo que nos demuestra que su obtención y refinación es un procesamiento complejo.

El proceso de recuperación de paladio (Pd) y platino (Pt) comienza con la purificación de los lodos de oro, con el objetivo de lixiviar y remover los elementos que comprometen la calidad del oro refinado. De este proceso se obtiene un efluente rico en plata y MGP, que se convierte en la base del proceso de recuperación de Pd y Pt.

Para lograr la máxima concentración de plata en el efluente, se lleva a cabo una precipitación selectiva del metal con ácido clorhídrico (HCl) para formar AgCl sólido. La solución agotada en plata obtenida contiene MGP de gran valor, los cuales pueden ser recuperados mediante un proceso de precipitación global.

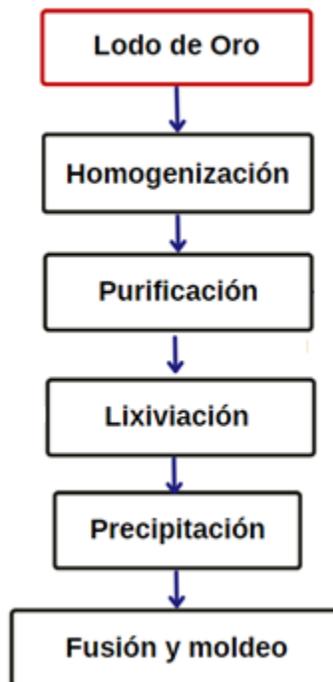
Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de un agente complejante que tiene la capacidad de formar compuestos complejos con los metales o iones metálicos presentes en la solución, concentrándolos en sólido. El sólido resultante es comercialmente conocido como concentrado de metales preciosos (CMP), que

es altamente valorado debido a los altos contenidos de paladio, platino, rodio, iridio, oro y plata.

El CMP se resguarda para su posterior tratamiento y aprovechamiento en diversas aplicaciones industriales. En la Figura 15 encontramos el diagrama de las operaciones de la refinería de oro de Metalúrgica de Cobre.

Figura 15

Operaciones de refinería de oro



El elixir de metales preciosos, fruto del arduo proceso de recuperación de paladio y platino en la renombrada Metalúrgica de Cobre, se sometió a una exploración exhaustiva para desentrañar su compleja composición química y estructural. Estos estudios incluyeron la aplicación de técnicas como la difracción de rayos X, el microscopio electrónico de barrido con energía dispersa (MEB-EDS) y el microscopio minero gráfico.

Los resultados obtenidos sugieren, mas no afirman, que el paladio presente en el concentrado de metales preciosos se encuentra en forma de oxalato hidratado de amonio y paladio ($C_4H_8N_2O_8Pd.H_2O$), aunque no se puede descartar la posibilidad de que esté presente como un cianuro de paladio hidratado ($Pd_2(CN_4).H_2O$).

Gracias a este sin fin de estudios, se ha logrado dimensionar con precisión la composición del concentrado de metales preciosos, excluyendo las partículas metálicas. Las Tablas 4 y 5 obtenida del análisis por MEB-EDS muestra los elementos presentes en la muestra en dos diferentes puntos, lo que nos permite comprender mejor las propiedades y potencialidades del concentrado. Estos resultados son de gran importancia en términos de su posterior tratamiento y aprovechamiento.

Tabla 4

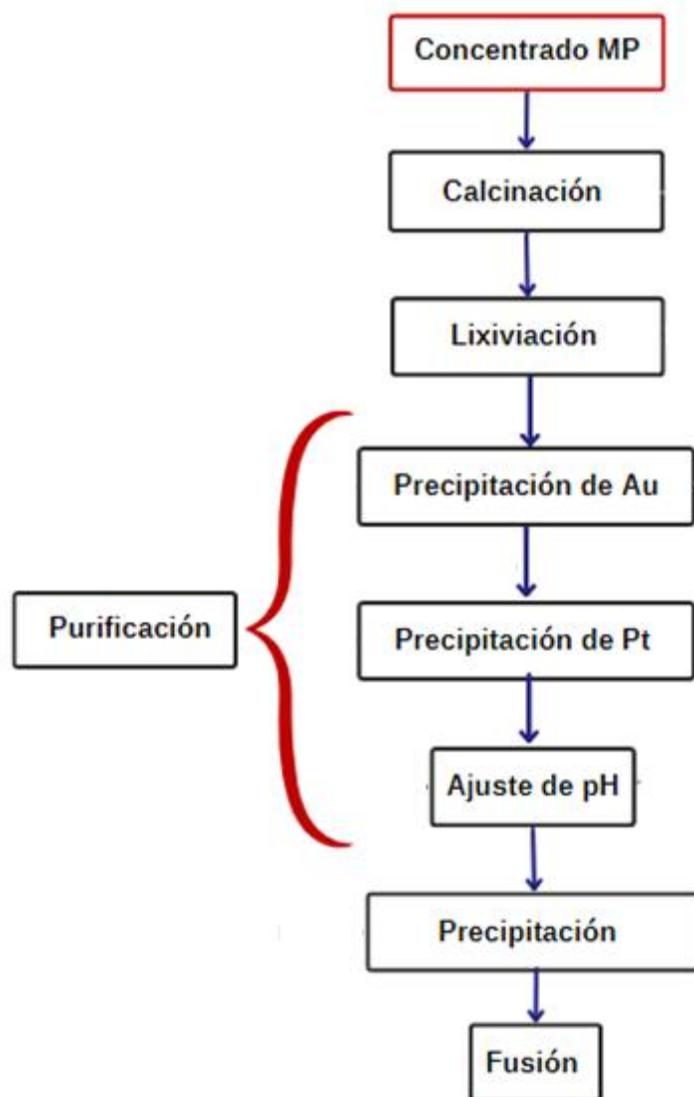
EDS

Elemento	Peso %	Elemento	Peso %
O	42.95	C	26.84
S	4.09	O	25.72
Cl	1.39	S	4.92
Cu	0.70	Cl	1.26
Pd	34.98	Cu	0.78
Ag	7.13	Pd	27.26
Pt	8.76	Ag	6.22
		Pt	7.0

Con el fin de aprovechar al máximo el valor de este metal, se desarrollaron y adaptaron metodologías para su recuperación mediante tratamientos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos, las cuales se representan por etapas en la Figura 16 y se describen a continuación.

Figura 16

Proceso general para la obtención de paladio



I. Calcinación

Es de gran importancia conocer la composición química de los materiales ya sea para una aplicación en específico o como en este caso para su beneficio, gracias los estudios realizados al precipitado de Paladio-Platino sabemos que es posible concentrar aún más los metales contenidos en él, gracias a que las impurezas como el Oxígeno, Azufre y el Carbono son volátiles a temperaturas relativamente bajas.

La calcinación se basa en la descomposición del concentrado de metales preciosos en donde se generan gases como el CO₂, SO₂ y el O₂, entre otros. Como objetivo principal de la calcinación es concentrar los contenidos metálicos del concentrado y como objetivo adicional transformar los compuestos de Paladio, Platino y Rodio en compuestos que faciliten la lixiviación.

A partir de una muestra del concentrado de metales preciosos calcinado, se obtuvo el siguiente análisis químico representado en la Tabla 5:

Tabla 5

Composición de CMP calcinado

Elemento	Peso%
Pd	72.17
Pt	4.11
Au	3.01
Ag	3.77

II. Lixiviación de CMP:

Recuperar metales preciosos como el Paladio, Platino y Rodio se vuelve un verdadero desafío debido a su innata resistencia a disolverse. Su nobleza los convierte en verdaderos caprichosos. Entonces, ¿cómo hacer para extraerlos? La clave radica en un proceso de lixiviación que combine ácidos fuertes con agentes oxidantes. Un espectáculo químico que se debe realizar con precisión para obtener una solución de concentración adecuada. El ácido clorhídrico se lleva el premio por ser el agente complejante más popular, pero no se queda solo. El ácido nítrico, sulfúrico y hasta el peróxido de hidrógeno también quieren ser parte del juego como agentes oxidantes.

Es fascinante destacar como el conocimiento profundo en materia química de estos metales nos ofrece amplias posibilidades, como el hecho de que, en combinación con soluciones altamente ácidas, nuestros caprichosos metales (Paladio, Platino y Rodio) se divierten formando complejos halógenos. Por eso, el tratamiento clásico para extraer los metales preciosos utiliza una mezcla conocida como agua regia. Esta mezcla altamente corrosiva de ácido clorhídrico y ácido nítrico, en una relación 3:1, desata una tormenta de reacciones. Esto desencadena una fiesta química dando como resultado una solución de alta concentración de Paladio y Platino.

La lixiviación, un proceso fascinante que nos adentra en un mundo de combinaciones y reacciones químicas asombrosas. Es un proceso donde los metales preciosos entran en juego con ácido clorhídrico y ácido nítrico en proporciones cambiantes, creando reacciones químicas llenas de matices y desafíos.

Los metales como Pd, Pt y Rh son elementos valiosos que desafían las leyes de la disolución, pero que, con astucia y precisión, se rinden a los encantos de los ácidos mencionados. Así surgen complejos solubles como H_2PdCl_6 , H_2PtCl_6 y H_3RhCl_6 , que despiertan asombro por su estructura sofisticada y de gran singularidad. Cada combinación es un rompecabezas químico en constante movimiento que nos invita a explorar sus secretos más profundos.

En este intrigante proceso de lixiviación, la clave reside en encontrar el equilibrio perfecto entre los elementos y ácidos, una danza química que desencadena la concentración deseada de metales preciosos en la solución final.

La proporción exacta en la que se llevan a cabo estas reacciones heterogéneas se convierte en el hilo conductor que guía nuestros pasos hacia la obtención de las siguientes posibles combinaciones de elementos cuyas concentraciones puntuales por elemento las encontramos en la Tabla 6.

- $3\text{Pd}+4\text{HNO}_3+18\text{HCl}\rightarrow 3\text{H}_2\text{PdCl}_6+4\text{NO}+8\text{H}_2\text{O}$
- $\text{Pd}+4\text{HNO}_3+6\text{HCl}\rightarrow \text{H}_2\text{PdCl}_6+4\text{NO}_2+4\text{H}_2\text{O}$
- $3\text{Pt}+4\text{HNO}_3+18\text{HCl}\rightarrow 3\text{H}_2\text{PtCl}_6+4\text{NO}+8\text{H}_2\text{O}$
- $\text{Pt}+4\text{HNO}_3+6\text{HCl}\rightarrow \text{H}_2\text{PtCl}_6+4\text{NO}_2+4\text{H}_2\text{O}$
- $2\text{Rh}+2\text{HNO}_3+12\text{HCl}\rightarrow 2\text{H}_3\text{RhCl}_6+2\text{NO}+4\text{H}_2\text{O}$

Tabla 6

Lixiviado de CMP

Elemento	g/l
Pd	75.930
Pt	2.9970
Au	0.0903
Ag	0.3449

Las recuperaciones de los MGP se consideran bajas, como se muestra en la Tabla 7

Tabla 7

Análisis

Elemento	Recuperación%
Pd	53.1893
Pt	36.8735
Au	1.5167
Ag	4.6234

Las bajas recuperaciones de los metales preciosos se deben a la baja liberación de estos, debido a que el compuesto formado inicialmente tiene características refractarias.

Se puede denominar materiales refractarios a aquellos en los cuales el metal no es recuperable por concentración gravimétrica básica o por lixiviación simple. Brindan una recuperación inferior del 75%.

Debido a las bajas recuperaciones de los metales, se decide volver aplicar calor al insoluble recuperado de la lixiviación, el objetivo de esta segunda “calcinación” es liberar los metales contenidos, así como la transformación de estos a compuestos que sean más reactivos y que faciliten la lixiviación de estos.

Los resultados de la segunda lixiviación fueron favorables, los análisis de las soluciones se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Análisis

Elemento	g/l
Pd	55.93
Pt	2.774
Au	0.1512
Ag	0.5845

Las recuperaciones de MGP incrementaron considerablemente como se observa en la Tabla 9.

Tabla 9

Análisis

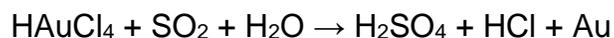
Elemento	Recuperación%
Pd	81.75
Pt	96.03

III. Precipitación del oro de las soluciones Pd-Pt

Una vez recuperada la solución de la lixiviación del concentrado de metales preciosos es importante “purificar” la solución de metales que pudiesen contaminar el paladio metálico y así lograr una calidad relativamente alta del mismo.

La primera etapa de purificación de la solución es la precipitación del Oro. Esto se lleva a cabo mediante la inyección de un agente reductor, siendo este el dióxido de azufre (SO₂).

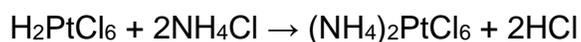
La reacción dominante de esta primera etapa se observa en la siguiente ecuación:



IV. Precipitación del platino de las soluciones Pd-Pt

El Platino se precipita al agregar el NH₄Cl, formando hexacloroplatinato de amonio, un precipitado de color amarillento.

La reacción de precipitación del Platino está dada en la siguiente ecuación:



III. Dilución de la solución ácida

El licor resultante de la purificación, cuyo análisis encontramos en la Tabla 10, es una solución ácida con altas concentraciones de paladio.

Tabla 10

Análisis

Elemento	g/l
Pd	146.10
Pt	1.6040
Au	0.6117
Ag	0.1885
Cu	6.1320

Es posible apreciar que la concentración de paladio es óptima para su recuperación, pero se ha demostrado experimentalmente que manejar una solución de concentraciones por encima de los 100 g/l de Pd, genera problemas en su manipulación, ya que tiende a formar soluciones viscosas difíciles de filtrar y procesar, por lo que se busca utilizar la concentración más eficiente posible, que se permita una recuperación óptima y un manejo que no permita mermar en el tiempo de sus procedimientos.

Es por esto por lo que se decide diluir dicha solución a concentraciones que cumplieran con los requerimientos anteriores, para esto fue necesario adicionar un total de 660 ml de H₂O de proceso, por cada litro de solución ácida.

Tabla 11

Concentración después de dilución

Elemento	g/l
Pd	88.000
Pt	0.9661
Au	0.3684
Ag	0.1135
Cu	3.6934

IV. Ajuste de pH

Una vez que los metales preciosos y cualquier subproducto se hayan eliminado de la solución, los ácidos deben ajustarse para eliminar las impurezas de manera efectiva. Estas impurezas son principalmente hidróxidos y aunque no tienen una importancia económica significativa y su concentración es baja, juntas pueden degradar la calidad del paladio metálico.

Es importante eliminar estas impurezas para que el paladio producido sea de alta calidad y valor justo en el mercado. Para esto, el pH de la solución se ajusta cuidadosamente para que las impurezas sean eliminadas por el proceso de precipitación. Esto asegura que el producto final sea de la mejor calidad posible.

V. Precipitación

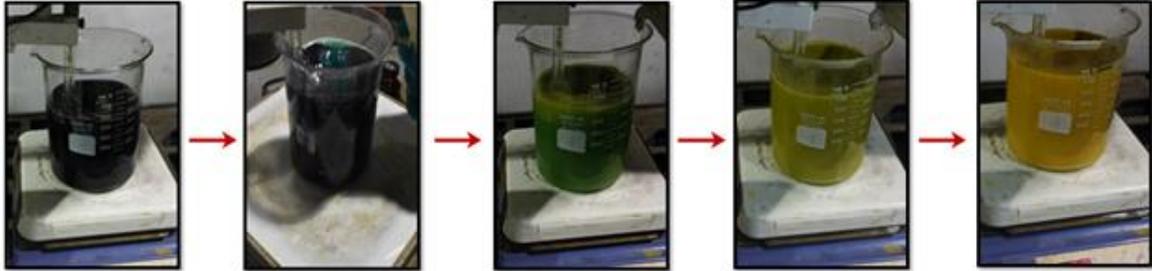
Después de la purificación de la solución, el paladio se precipita selectivamente. Este es un proceso químico importante que ayuda a purificar el paladio. Durante la precipitación, se agregan productos químicos a la solución de paladio para crear partículas sólidas.

Estos sólidos son necesarios para eliminar las impurezas restantes y restaurar el paladio de alta calidad. El proceso de precipitación selectiva ayuda a separar el paladio de otros elementos en solución y permite la recuperación de paladio puro.

En resumen, la precipitación es un proceso importante para purificar el paladio y separarlo de otros elementos. Esto permite obtener productos finales de alta calidad y alto valor en el mercado y podemos observar el espectáculo de colores que esta reacción los brinda en la Figura 17.

Figura 17

Proceso de precipitación



VI. Fusión

Por último, ya que se obtiene el precipitado de Paladio seco, este se somete a temperaturas considerablemente altas con el fin de volatilizar el contenido en el sólido.

La pureza del metal será directamente proporcional a la temperatura a la que se somete el sólido, debido a que se propiciará una mayor liberación de compuestos, el límite será la temperatura de fusión del Paladio (1555°C). Es recomendable que la calcinación del precipitado de Paladio se lleve a cabo en un ambiente reductor o libre de oxígeno.

5 Metodología experimental

Un proceso o prueba experimental es un conjunto de pasos que rigen la realización de un determinado fenómeno, basado en hipótesis y argumentos teóricos plausibles, que tanto en su proceso como en su resultado se convierte en una herramienta que nos brinda la información necesaria para la toma de decisiones sobre cuál es el rumbo que el proceso general debería tomar. Dichas pruebas requieren de claridad, exactitud y precisión, evitando posturas cerradas, inamovibles o dadas por hecho, para que los resultados sean lo más representativos posibles.

Bajo el criterio de que la mejor experiencia se obtiene del análisis y observación de un proceso físicamente, así como de sus estudios químicos, y buscando facilitar la toma de decisiones de nuestro proyecto, es que se optó por tomar una postura de constantes pruebas experimentales para la continuación del proyecto.

En beneficio de este proyecto y de procurar el cumplimiento del objetivo general de documentar, medir y eficientar las distintas etapas en materia de seguridad y calidad para la producción de paladio, se toma la decisión de desarrollar una serie de pruebas, basadas en reporte de resultados de pruebas previas, buscando así aumentar la efectividad de los procedimientos al atacar los problemas subyacentes de manera específica.

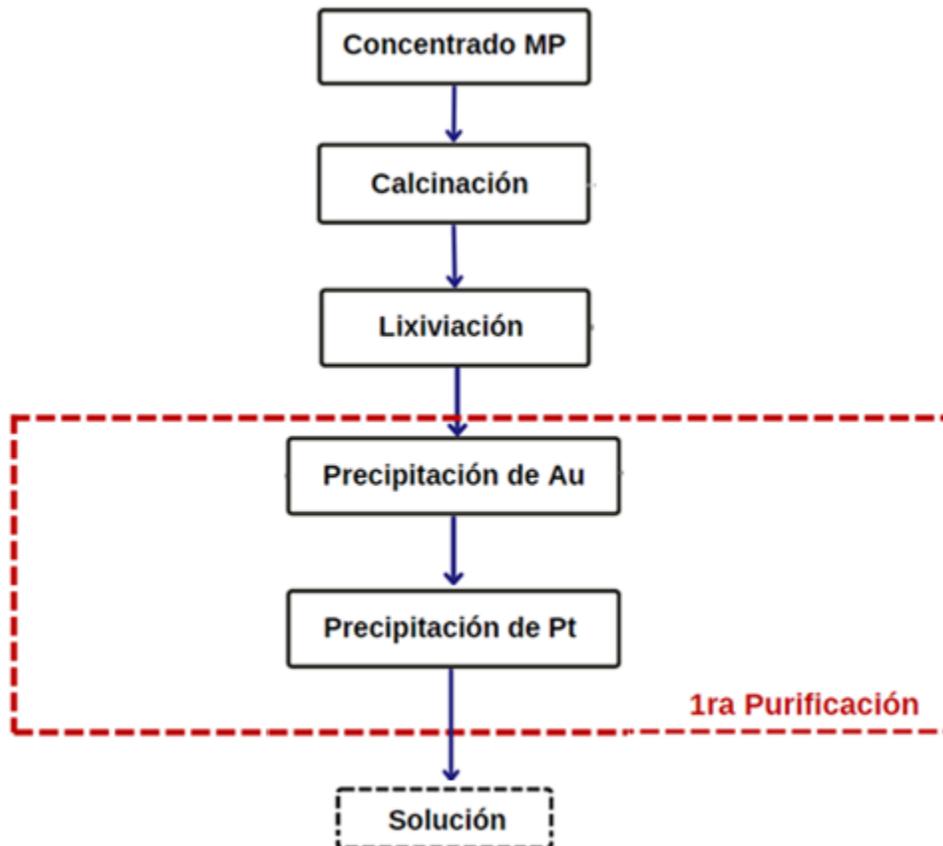
Con el objetivo de obtener un paladio más puro, se ha diseñado una metodología experimental dividida en dos partes. En la primera parte, se busca reemplazar un agente químico utilizado en el proceso de lixiviación para disolver el metal por otro que permita obtener una solución más pura.

La solución obtenida en la Figura 18, fruto de un proceso previo de lixiviación, precipitación y purificación del concentrado de metales preciosos, es el punto de partida para la refinación del paladio. En este sentido, se requerirá someter la solución a una serie de procesos químicos específicos para separar el paladio de los demás metales presentes y purificarlo aún más.

Es decir, a partir de esta solución, se llevarán a cabo las pruebas experimentales que buscan obtener un paladio más puro, las cuales podrán requerir la utilización de diferentes reactivos y parámetros específicos.

Figura 18

Proceso de obtención de solución madre



A continuación, se describe el desarrollo de cada una de las pruebas.

5.1 Prueba 1

Sustitución de un reactivo en la etapa de ajuste de pH y la incorporación de una nueva etapa.

5.1.1 Fundamento

Se ha comprobado la eficiencia del uso de un reactivo para recuperación de Paladio, por su afinidad y facilidad de formar compuestos con metales del grupo platino. Dicho reactivo tiene la característica de ser de manejo riesgoso. Basados en la norma ISO 45001: 2018, la cual pretende proporcionar un enfoque sistemático para aumentar la seguridad y salud en el trabajo, eliminar los peligros, y reducir o controlar los riesgos, es necesaria la sustitución del mismo, para esto se requiere explorar alternativas para evitar riesgos innecesarios y buscando que dicho sustituto trabaje de una forma similar o incluso mejor, aunque también podría solo ser necesario asegurar un correcto manejo del reactivo como se ha venido haciendo hasta ahora. El sustituto por naturaleza del reactivo es otro compuesto con propiedades similares. Es decir, la diferencia clave entre el reactivo original y el sustituto existe en sus propiedades físicas y químicas. Por lo tanto, se realizarán pruebas de interacción con los dos agentes, utilizando cada uno en las distintas etapas que el proceso requiere.

Aunado a esto, se verá la posibilidad de anexar una nueva etapa al procedimiento general y así posibilitar un mayor barrido de impurezas propiciando la refinación del paladio metálico de alta pureza.

5.1.2 Procedimiento

El ajuste de pH se considera como una etapa primordial en múltiples procesos químicos. Con frecuencia, el control del pH se vuelve la clave maestra que asegura el adecuado desenvolvimiento de la reacción y la obtención del producto anhelado. Los procedimientos para ajustar el pH abarcan la manipulación de una solución y la adición de reactivos específicos para alcanzar un pH determinado.

Uno de los movimientos habituales en el ajuste de pH es la aplicación de la lixiviación de precipitados, en la cual se agrega un reactivo al precipitado sólido para

disolverlo y obtener una solución acuosa. Durante este proceso, se deben realizar mediciones del pH para controlar la alcalinidad de la solución y asegurar una disolución adecuada del precipitado. En la Figura 19 se observa el ajuste de pH, que es una parte esencial del proceso de lixiviación.

Figura 19

Representación del proceso de ajuste de pH



Otro método frecuente en el ajuste del pH consiste en la adición de ácido o base a una solución para disminuir o aumentar el pH, respectivamente. En esta etapa visualmente muy descriptiva, se realiza un seguimiento constante del pH mientras se agregan pequeñas cantidades de reactivo para alcanzar el valor deseado.

En ambos pasos, resulta vital contar con un pH-metro calibrado y una agitación adecuada que aseguren la homogeneidad de la solución y la precisión en las mediciones de pH. Además, es importante realizar anotaciones precisas para documentar el proceso y los resultados obtenidos.

En el proceso de precipitación, se agrega una sustancia a la solución de paladio. Se coloca el recipiente con la solución en la plancha de agitación magnética y se verifica el pH inicial. Luego, se dosifica otra sustancia en la solución hasta que el pH alcance un valor deseado. Se deja reaccionar durante un tiempo y se filtra el precipitado obtenido, el procedimiento se muestra en la Figura 20.

Figura 20

Demostración del proceso de precipitación



5.1.3 Observaciones

Durante la realización del experimento se pudieron observar algunos fenómenos interesantes. La duración del proceso fue registrada y podría ser de utilidad para futuras pruebas. En la primera etapa del procedimiento, se notó una formación rápida de sólidos que provocó dificultad en la agitación. Conforme el pH del sistema cambiaba, se pudo apreciar la disolución lenta y un eventual agotamiento de los sólidos.

Durante las pruebas, se tomó nota del cambio de color de la solución en relación con distintos parámetros, como se muestra en la Figura 21, lo que podría ser útil como referencia para futuras estimaciones en el proceso. En cuanto a los posibles riesgos, se pudo observar que las emisiones eran nulas al principio del proceso y solo comenzaban cuando el pH alcanzaba un valor determinado. La

formación de sólidos era un indicador de que el proceso estaba en marcha, pero su presencia complicaba la filtración y debía tomarse en cuenta para cuantificar los tiempos del proceso, en la Figura 21 podemos apreciar visualmente el proceso de ajuste de purificación.

Figura 21

Proceso de purificación



En la Figura 22, se puede observar que la muestra metálica 1 presenta una apariencia visual más limpia en comparación con la muestra metálica 2, la cual presenta incrustaciones y señales de imperfecciones. Sin embargo, ambas muestras comparten características positivas de maleabilidad y brillo metálico típico del paladio.

Figura 22

Muestras metálicas de Pd (2) y (1)



Es importante destacar que la presencia de incrustaciones en la muestra metálica 2 puede ser una indicación de que el proceso de refinación no fue completamente efectivo en la eliminación de impurezas. Por lo tanto, se podría requerir una evaluación adicional para identificar las causas subyacentes y abordarlas específicamente en futuros procesos de refinación. En general, los resultados obtenidos sugieren que la muestra metálica 1 puede ser de mayor pureza y calidad visual, pero se requieren un análisis más detallado para confirmar esta hipótesis.

5.2 Análisis de resultados

Se llevaron a cabo pruebas para obtener muestras metálicas de Pd de alta pureza, cuyas composiciones fueron investigadas mediante ensayos de calidad y los resultados se presentaron en la Tabla 13.

Tabla 13

Análisis de pureza

Composición	Pd metálico (%)	Pd metálico (%)
Pd AA	99.060	98.995
Pd resta	99.631	99.373
Ag	0.0047	0.3837
Au	0.0180	0.0249
Ir	0.1564	0.0629
Pt	0.0361	0.0280
Rh	0.0148	0.0152
Cu	0.0015	0.0052
Bi	0.0005	0.0005
Pb	0.0555	0.0591
Sb	0.0005	0.0005
Se	0.0654	0.0180
Te	0.0005	0.0055
Fe	0.0133	0.0216
Zn	0.0021	0.0017

Se observó una clara diferencia en los porcentajes de pureza alcanzados en las muestras metálicas, siendo el uso de un agente químico el que logró una recuperación final más limpia y alcanzó el porcentaje de pureza más alto registrado durante el proyecto. Sin embargo, al analizar específicamente la efectividad, la diferencia en el margen de pureza entre ambas muestras fue de alrededor de 0.258%, debido principalmente a un mayor arrastre de plata.

En cuanto al análisis de pureza, se concluyó que el método de resta de impurezas al volumen total de la muestra es más efectivo que la lectura directa de

concentración del metal de interés, ya que hay factores como el tiempo en reposo que pueden disminuir su absorbancia en el equipo instrumental.

Por otro lado, es bien sabido que cada prueba logra guiarte en virtud de los objetivos, pero es grato obtener resultados inesperados que logren ampliar tu panorama, en este caso, se descubrió la presencia de otro metal del grupo platino, el iridio (Ir), lo que deja un precedente para futuras pruebas y posible recuperación de este. La presencia de este metal es de gran interés, ya que el iridio es un elemento noble, altamente anticorrosivo y de densidad mayor a la de cualquier otro metal del grupo platino.

La comparación de resultados obtenidos de la producción de Pd metálico representada en la Tabla 14, muestra una clara diferencia en términos de eficiencia, pureza, tiempo de operación, riesgos y generación de fluyentes entre las dos muestras evaluadas. La muestra de Pd metálico (1) logró una eficiencia de pureza del 99.631%, pero requirió un tiempo de operación de aproximadamente 4 horas y presentó un alto riesgo en su proceso de producción. Además, generó una cantidad significativa de fluyentes.

Tabla 12

Comparación de resultados

	Pd metálico (1)	Pd metálico (2)
Eficiencia Pureza	99.631%	99.373%
Tiempos de operación	=4 horas	=20 minutos
Riesgos	Alto	Bajo
Generación de fluyentes	Bajo	Alto

Por otro lado, la muestra de Pd metálico (2) logró una pureza del 99.373% en un tiempo de operación de alrededor de 20 minutos, lo que redujo significativamente los riesgos asociados a su producción. Sin embargo, se generó una cantidad relativamente alta de fluyentes. La comparación de resultados permite tomar decisiones informadas para seleccionar la muestra de Pd metálico más adecuada para satisfacer los requisitos específicos de una aplicación determinada.

5.3 Prueba 2

Refinación de paladio con lixiviaciones múltiples

5.3.1 Fundamento

Con base a los resultados del análisis de pureza de las muestras metálicas de paladio obtenidas previamente, se puede determinar los próximos pasos a seguir identificando las impurezas que afectan la calidad del producto. Se comprobó que una segunda etapa en el procedimiento redujo significativamente la cantidad de impurezas, pero se encontró una brecha en la eficiencia entre dos posibles reactivos. Para solucionar esto, se añadió una repetición de la misma etapa. Además, se estudió la capacidad de ciertos elementos para disolverse en un ácido y se encontró que, con una concentración y temperatura específicas, se logra la disolución de estas impurezas sin afectar significativamente al paladio.

5.3.2 Procedimiento

El proceso de purificación y recuperación de paladio es una tarea compleja que implica una serie de pasos cuidadosamente diseñados para obtener un producto de alta calidad. En primer lugar, se realiza la purificación de la muestra de paladio seco y luego se lleva a cabo el proceso de recuperación.

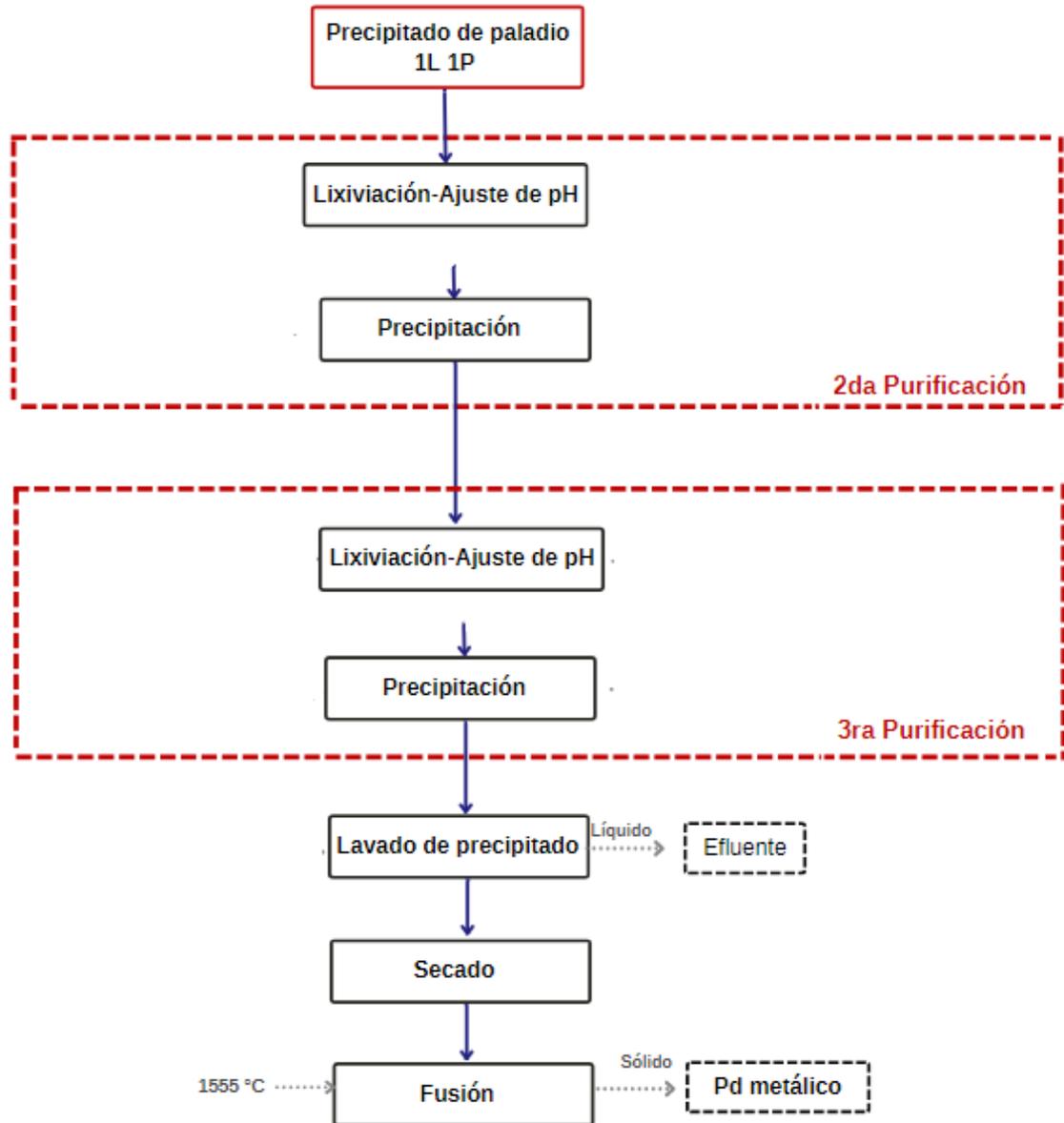
Una vez completada la precipitación, se procede a la filtración del precipitado para obtener el sólido deseado. Luego, se comienza a lavar cuidadosamente el precipitado para eliminar cualquier impureza residual y se seca para obtener un producto final de alta calidad.

Es importante destacar que el proceso de purificación y recuperación de paladio requiere una atención especial en cada paso para asegurar la calidad del producto final. La manipulación cuidadosa de los reactivos y la monitorización constante de los parámetros de la solución son esenciales para obtener un producto de alta pureza y evitar riesgos para la salud y el medio ambiente. ^[25]

Se puede observar de manera más clara el procedimiento en la Figura 23.

Figura 19

Proceso general de Prueba 2



5.3.3 Observaciones

Durante la ejecución de la prueba experimental, se llevaron a cabo dos ensayos que difieren en su metodología. La principal diferencia radica en la inclusión de una redisolución del precipitado de un metal en una solución con la finalidad de extraer otro metal presente en el sólido. Durante esta etapa, se observó que el precipitado presentaba una resistencia a la redisolución, lo que sugiere que el metal de interés puede ser parcialmente recuperable por lixiviación simple.

Se obtuvo una solución acida del metal de interés con una alta pureza, sin embargo, se formaron insolubles, lo que indica que es necesario investigar y analizar nuevas alternativas para lograr una recuperación más eficiente del metal.

Para mejorar la recuperación, se propone llevar a cabo una calcinación previa al precipitado con el objetivo de concentrar el contenido de metal en el precipitado, propiciar la transformación de compuestos y facilitar la lixiviación. En caso de obtener una alta recuperación del otro metal presente en los insolubles, se procederá con su recuperación.

En cuanto a la inclusión de una tercera purificación, se probaron dos procedimientos diferentes. El primero logra la dilución del precipitado, pero no permite un control en el ajuste de pH. El segundo proporciona un mayor control en el proceso y se recomienda su implementación general.

Durante el proceso de clarificación de la solución alcalina, se pudo constatar una presencia mínima de sólidos no disueltos en cada purificación, lo que indica una exitosa eliminación de impurezas. Es importante destacar que la correcta aplicación de técnicas de filtrado es crucial para prevenir la contaminación del producto final.

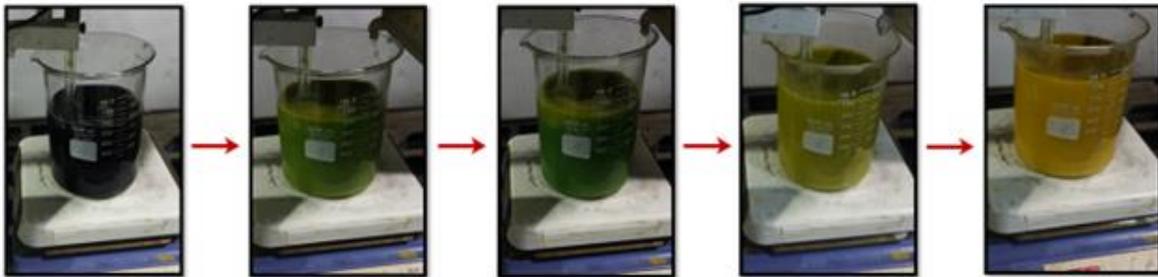
Asimismo, durante el lavado del sólido precipitado, se observó un leve cambio en los parámetros de pH, lo que sugiere una extracción eficiente de impurezas.

Por otro lado, durante la precipitación de paladio, el momento de adición del agente complejante resultó ser el factor más crítico. Es importante tener en cuenta que cada prueba presentará características propias, por lo que no se deberá

generalizar el procedimiento y se debe prestar especial atención a las fluctuaciones en el pH y deleitarse con el espectáculo de colores que el procedimiento ofrece, el cual podemos observar en la Figura 24.

Figura 20

Representación visual de las etapas de precipitación

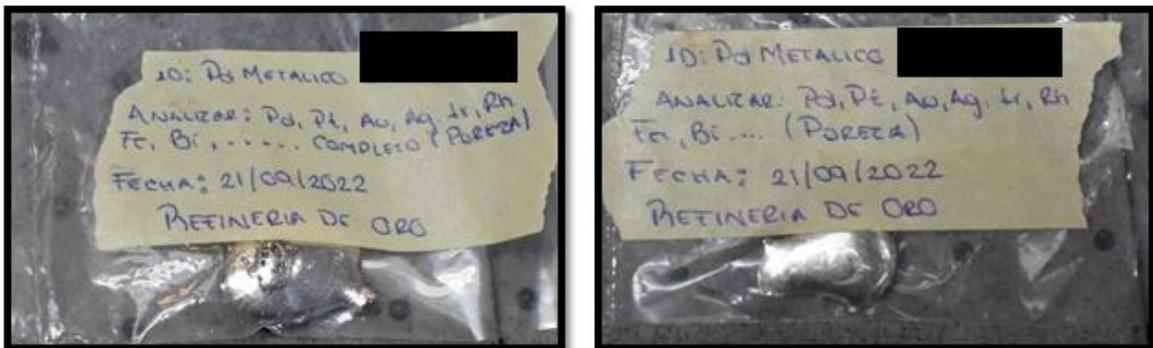


5.3.4 Análisis de resultados

Se llevaron a cabo dos ensayos de refinación de una muestra metálica, ambos produjeron una muestra con brillo metálico y textura maleable. En el ensayo 1, la muestra resultante tenía una coloración limpia y un brillo metálico matizado con tonos violeta debido a la cristalización en la formación del sólido. En cambio, en el ensayo 2, la muestra tenía una excelente nitidez y un brillo metálico muy puro, sin signos de cristalización, lo que sugiere una alta pureza. Además, ambas muestras eran altamente maleables, pero no llegaban a ser quebradizas, ambas muestras las podemos apreciar en la Figura 25, así como su orden de análisis.

Figura 21

Muestras metálicas de los ensayos 1 y 2



En cuanto al barrido de impurezas, podemos observar que, según la Tabla 15, los residuos producidos durante las etapas de precipitación y lavado contienen diferentes impurezas. En particular, se observa que el paladio está presente en las tres iteraciones y se encuentra en una concentración relativamente alta, aunque mínima, sin llegar a ser relevante. Sin embargo, las concentraciones de otras impurezas, como el oro, la plata, el iridio, el selenio y el telurio, disminuyen significativamente en cada iteración, lo que nos permite concluir que el barrido de estos elementos, aunque paulatino, es eficiente.

Tabla 13

Composición de efluentes, Prueba 2

Composición g/L	Efluente 1P (%)	Efluente 2P (%)	Efluente L (%)
Au	0.0072	0.0005	0.0922
Ag	0.0232	0.0396	0.0421
Cu			
Pd	0.5663	0.6479	0.3583
Pt	0.0026	0.0012	0.0005
Ácido	2.0000	4.0000	175.95
Rh	0.0051		0.0104
Bi	0.0100	0.0141	0.0029
Ir	0.0014	0.0001	0.0005
Se	0.0400	0.0510	0.0394
Te	0.0222	0.1511	0.0112
Fe	0.0117	0.0140	0.0128

La Tabla 16 muestra los resultados finales del análisis de pureza de las muestras metálicas de paladio obtenidos en las pruebas. Se puede observar que el paladio resultante en ambos ensayos tiene una pureza muy cercana a los tres nueves, lo que indica la eficacia del proceso de purificación. Además, hay una reducción significativa de la concentración de impurezas en comparación con las

composiciones del efluente de la etapa de precipitación y lavado, sin embargo, es importante analizar las impurezas presentes en la muestra y abordarlas de manera específica para mejorar aún más la pureza del paladio obtenido.

Tabla 14

Análisis de calidad de muestras metálicas, Prueba 2

Composición	Pd metálico-Ensayo 1 (%)	Pd metálico-Ensayo 2 (%)
Pd AA	96.22	96.612
Pd resta	99.858	99.878
Ag	0.0073	0.0247
Au	0.0174	0.0035
Ir	0.0009	0.0008
Pt	0.0116	0.0086
Rh	0.0058	0.0040
Cu	0.0024	0.0029
Bi	0.0001	0.0006
Pb	0.0369	0.0221
Sb	0.0010	0.0018
Se	0.0177	0.0135
Te	0.0003	0.0012
Fe	0.0369	0.0292
Zn	0.0040	0.0093

En conjunto, los resultados muestran que el proceso propuesto es altamente eficaz en la purificación del paladio metálico, mejorando significativamente su calidad y pureza. Los valores obtenidos indican que el proceso es capaz de separar y eliminar las impurezas presentes en el paladio y aumentar su calidad y valor.

Conclusiones y recomendaciones

En resumen, la metodología experimental que se ha llevado a cabo para la producción de paladio ha demostrado ser efectiva para el logro de los objetivos del proyecto en cuanto a la documentación, medición y eficientización de las distintas etapas en materia de seguridad y calidad.

El proyecto ha cumplido satisfactoriamente su objetivo general de mejorar el proceso metalúrgico de obtención de paladio, lo que ha permitido obtener un producto final más puro. La implementación de nuevos procedimientos, como la sustitución de un reactivo y la decisión de incluir una etapa adicional, ha resultado en regalarnos una mayor efectividad al abordar los problemas específicos en cada etapa del proceso.

La eliminación de impurezas y el uso de técnicas avanzadas de refinación han contribuido a mejorar la calidad del producto final, como lo han demostrado los análisis de laboratorio que indican una significativa mejora en la pureza del paladio obtenido. Estos avances no solo mejoran la calidad del producto, sino que también optimizan el proceso en términos de eficiencia.

Por otro lado, la implementación de una etapa de lavado con ácido nítrico demostró ayudar en el incremento de barrido de elementos que comprometen la calidad del paladio metálico, por lo que se recomienda realizar pruebas para su afinación.

En conclusión, la optimización del proceso ha sido una exitosa estrategia para mejorar la producción de paladio y evidencia el compromiso de la empresa con la excelencia y la innovación en la producción de metales preciosos.

Retroalimentación

Fortalezas:

- Excelente capacidad para trabajar en equipo y comunicación efectiva con mis compañeros y supervisores.
- Muestra de iniciativa y proactividad en la identificación y resolución de problemas.
- Manejo adecuado de las herramientas y tecnologías necesarias para llevar a cabo las tareas asignadas.
- Habilidad de adaptación a situaciones cambiantes y tomar decisiones en entornos dinámicos.

Debilidades:

- Necesidad de mejorar la capacidad para priorizar y organizar el trabajo en función de las necesidades del proyecto.
- Falta de conocimiento en ciertas áreas específicas de la metalurgia, lo cual es normal en un estudiante en prácticas.

Oportunidades detectadas durante la práctica:

- Posibilidad de profundizar en el conocimiento de algunos procesos metalúrgicos específicos.
- Oportunidad de trabajar en la mejora de la planificación y desarrollo de proyectos.
- Potencial para desarrollar habilidades en el manejo y análisis de datos, para mejorar la toma de decisiones basadas en evidencia.

Recomendaciones para mejorar la preparación de los egresados de la carrera:

- Incluir en el programa de estudio de la carrera un enfoque más práctico, que permita a los estudiantes desarrollar habilidades específicas requeridas en el campo laboral.

- Incluir en el programa de estudio la opción de especialidad metalúrgica, ya que al ser Sonora un estado con alta presencia de empresas minero-metalúrgicas, se considera de gran importancia que el egresado sea capaz de desarrollarse libremente en esta área.
- Fomentar el trabajo en equipo y la comunicación efectiva desde los primeros años de la carrera.
- Promover la educación continua y la actualización constante en temas relevantes para la industria metalúrgica.

Referencias

1. González-Sánchez, F., & Camprubí, A. (2010). La pequeña minería en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 100-108.
2. SGM. (noviembre 2019). Panorama Minero del Estado de Sonora. https://www.sgm.gob.mx/Gobmx/productos/panoramas/SONORA_dic2019.pdf.
3. Gómez, R. D. J. T. (2017). *Recuperación de metales del grupo del platino por métodos hidrometalúrgicos* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Metropolitana).
4. Sancho y col. (2000). Conceptos fundamentales de metalurgia extractiva. (cap. 1) Burkin 2001 (cap. 1).
5. Gómez, R. D. J. T. (2017). *Recuperación de metales del grupo del platino por métodos hidrometalúrgicos* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Metropolitana).
6. Rodríguez, J. V. (2014). Determinación del contenido de platino en polvos urbanos del área metropolitana de la ciudad de México (doctoral dissertation, universidad nacional autónoma de México).
7. Grupo México (2019). Informe de desarrollo sustentable 2019. Recuperado de: www.gmexico.com/GMDocs.
8. Opportimes. (15/11/2016). GRUPO MÉXICO LIDERA PRODUCCIÓN DE COBRE CATÓDICO *Opportimes*.
9. Prucommercialre (2022). *¿Qué es la Fundición de Cobre?* prucommercialre.com. Recuperado de: <https://www.prucommercialre.com/que-es-la-fundicion-de-cobre>
10. Codelco (2018). *Conoce y aprende del proceso productivo del cobre*. Recuperado de: [El proceso productivo del cobre | Codelco Educa](#).

11. Concepto ABC. (2019). *Metales nobles*. Conceptoabc.com Recuperado de <https://conceptoabc.com/metales-nobles/>.
12. (What is the difference between a «noble» metal and a «precious» metal? (s. f.). Quora. Recuperado de: <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-a-noble-metal-and-a-precious-meta>).
13. Helmenstine, A. (2021, 31 agosto). Precious Metals List and Value. Science Notes and Projects. Recuperado de: <https://sciencenotes.org/precious-metals-list-and-value/>.
14. Boliden (1998) *Manuales de operación de la planta de metales preciosos. Manual interno de Metalúrgica de Cobre*.
15. Planta de metales preciosos (2022) *Descripción general del proceso de la planta de metales preciosos. Manual interno de Metalúrgica de Cobre*.
16. Salazar-Campoy, M. M., & Pérez-Tello, M. *Estudio de la hidrodinámica de un horno caldo en un modelo a escala a temperatura ambiente. Reporte interno de Metalúrgica de Cobre*.
17. EcuRed. (s. f.). Paladio - EcuRed. <https://www.ecured.cu/Paladio>
18. EcotradeGroup. (2022). *Precios de los metales*. Recuperado de: <https://www.ecotradegroup.com/es/blog/el-aumento-ineluctable-de-los-precios-del-paladio>.
19. Precio metales. (2022). Recuperado de <https://www.preciometales.com/precio-paladio>.
20. Gómez, R. D. J. T. (2017). *Recuperación de metales del grupo del platino por métodos hidrometalúrgicos* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Metropolitana).
21. El precio del Paladio, en directo - Silver Gold Patrimonio. (2022, 3 marzo). Silver Gold Patrimonio. Recuperado de: <https://www.silvergoldpatrimonio.com/precio-paladio/>
22. Minera, R. T. (2020, 9 enero). Demanda creciente y futuros inciertos: el aumento del paladio. Tecnología minera. Recuperado

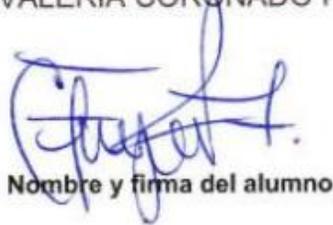
de: <https://tecnologiaminera.com/noticia/demanda-creciente-y-futuros-incierto-el-aumento-del-paladio>.

23. Compraoro.org – Todo sobre el oro y el mundo de los metales: precio, producción, inversión. (n.d.). Recuperado de: <https://compraoro.org/>.

24. Servicio Geológico Mexicano | Gobierno | gob.mx. (n.d.). Recuperado de: <https://www.gob.mx/sgm>.

25. ChatGPT, comunicación personal, (05 de mayo del 2023)

CLAUDIA VALERIA CORONADO FIGUEROA



Nombre y firma del alumno

JESUS PORCAYO CALDERON



Nombre y firma del tutor de prácticas profesionales Unison