



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“ESTUDIO DE LA EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO DE ORO CON UN ALCOHOL
ALIFÁTICO”**



TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

SERGIO MAYA AYALA

ASESORES:

M.C. MARÍA ELENA NÚÑEZ GAYTAN

MAESTRA EN CIENCIAS QUÍMICAS

M.C. ANA MARÍA NÚÑEZ GAYTAN

MAESTRA EN CIENCIAS QUÍMICAS

MORELIA, MICHOACÁN; ENERO 2013



RESUMEN

La extracción líquido-líquido o extracción por solventes es una de las principales técnicas para la recuperación a nivel industrial en hidrometalurgia de metales valiosos.

Este proceso es una alternativa de separación, purificación y obtención de metales al proceso pirometalúrgico.

En las últimas décadas se ha estado investigando su uso para otras importantes aplicaciones que van desde aplicaciones en campos de la medicina, nanotecnología, industria aeroespacial y catalizadores para múltiples reacciones químicas. El único problema es que es muy escaso en la naturaleza, por eso es un material muy caro, y su recuperación y extracción se ha hecho sumamente importante.

En los últimos años, científicos e ingenieros han estado investigando arduamente nuevos métodos y mecanismos para mejorar la recuperación del oro mediante la implementación de novedosos extractantes. Esta es una de las razones por la cual se ha querido investigar nuevos métodos de extracción líquido-líquido.

En este trabajo se estudia y analiza experimentalmente la **extracción líquido-líquido** de **Au(III)** de medios concentrados de ácido clorhídrico usando como extractante **decanol** disuelto en keroseno. En este trabajo, se estudia la influencia del tiempo de extracción o tiempo de contacto entre las fases acuosa y orgánica, el efecto de la concentración de HCl y del extractante en la eficiencia de extracción. En éste caso se observa que el tiempo mínimo de contacto entre las fases para alcanzar condiciones de equilibrio es de 10 min. Los resultados indican que se aumenta el porcentaje de extracción al incrementar la concentración de HCl y de decanol .

Las condiciones optimas para la extracción de oro(III) 0.2 mM son, a temperatura ambiente, una concentración de HCl 7 M y una concentración de decanol de 2.61 M disuelto en keroseno dando un porcentaje de extracción mayor del 98%.

El análisis cuantitativo de las concentraciones de oro se realizó por medio de la metodología analítica de Espectrofotometría UV-VIS (Ultravioleta-Visible) a una longitud de onda de 313.8 nm en las condiciones de equilibrio.

DEDICATORIAS:

**“... A MIS PADRES, QUE ME HAN DADO TODO SU
CONFIANZA Y AMOR, Y SIEMPRE ME HAN APOYADO,
INFINITA GRATITUD A ELLOS...”**

**“ ... A MI HERMANO, QUE ME HA DADO MUCHOS
ANIMOS Y SU APOYO ES MUY VALIOSO PARA MI...”**

**“... A MI NOVIA ELIZABETH QUE SIEMPRE
ESTA CONMIGO EN LAS BUENAS Y EN LAS MALAS,
Y ME ALIENTA A CUMPLIR CON MIS METAS...”**

**“... A MI ASESORA DE TESIS M.C. MARÍA ELENA NÚÑEZ GAYTAN
QUE CONFÍÓ EN MI Y ME OTORGÓ SU TIEMPO,
DEDICACIÓN Y APOYO EN LA REALIZACION DE LA MISMA...”**

**“... A MIS MAESTROS, QUE ME HAN ENSEÑADO EL BELLO
CAMINO QUE ES LA INGENIERIA QUÍMICA,
SON LA BASE DE LO QUE HOY SOY...”**

**“... A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS QUE DE ALGUNA
U OTRA MANERA HAN ESTADO CONMIGO DURANTE EL TIEMPO QUE LOS
HE CONOCIDO...”**

ÍNDICE

	PÁGINA
RESUMEN.....	i
DEDICATORIAS.....	iii
ÍNDICE.....	v
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 HISTORIA DEL ORO.....	1
1.2 QUÍMICA DESCRIPTIVA DEL ORO.....	2
1.3 PROPIEDADES Y USOS.....	3
1. 4 COMPLEJACIÓN DE IONES METALICOS.....	7
1.4.1 COMPLEJOS DE ORO.....	7
1. 4.2 ÁCIDO CLOROÁURICO.....	8
1. 5 EXTRACCIÓN POR SOLVENTE EN HIDROMETALURGIA.....	9
1.5.1 EXTRACCIÓN DE METALES PRECIOSOS.....	9
1.5. 2 EXTRACCIÓN DE ORO.....	10
1. 6 ESTUDIOS SOBRE EXTRACCIÓN LIQ-LIQ PARA SEPARAR ORO.....	12
. Cianuración de oro	12
.Extracción de oro en Nigeria de lixiviados de acido clorhídrico de menas de oro con tributilfosfato.....	13
.Refinación de oro por extracción por solvente – proceso MinataurTM.....	14
1. 7 IMPORTANCIA DE LA RECUPERACIÓN DE ORO EN MATERIAL DE DESECHO ELECTRONICO.....	14
1.8 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.9 OBJETIVOS.....	15
1.9.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.9.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15

1.10 HIPOTESIS.....	16
CAPITULO II. GENERALIDADES O MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 EXTRACCIÓN LIQ-LIQ.....	17
2.1.1 CONCEPTO DE FASE ORGÁNICA, EXTRACTANTE.....	19
2.1.2 PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN.....	21
2.1.3 COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN.....	23
2.1.4 SELECTIVIDAD.....	25
2.2 ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS (Ultravioleta-Visible).....	26
2.2.1 PROPIEDADES DE LA LUZ.....	26
2.2.2 ABSORBANCIA.....	29
2.2.3 LEY DE BEER.....	29
2.2.4 ESPECTRO DE ABSORCIÓN.....	30
2.2.5 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN UV-VIS (ULTRAVIOLTA-VISIBLE).....	31
CAPITULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO.....	32
3.1 METODOLOGÍA.....	32
3.2 METODO CUANTITATIVO.....	32
3.3 REACTIVOS Y EQUIPO.....	33
3.4 PROCEDIMIENTO.....	35
3.4.1 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CONTACTO DE LAS FASES (TIEMPO DE AGITACIÓN).....	35
3.4.2 EXTRACCIONES.....	35
3.4.3 PRUEBA DE SELECTIVIDAD DEL EXTRACTANTE.....	36

CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
4.1 TIEMPO DE AGITACIÓN.....	37
4.2 EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN.....	38
4.3 COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN.....	40
4.4 SELECTIVIDAD DEL EXTRACTANTE CON OTROS METALES.....	41
4.4.1 Extracción de paladio Pd.....	41
4.4.2 Extracción de platino Pt.....	42
4.4.3 Extracción de cobre Cu.....	43
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
5.1 CONCLUSIONES.....	44
REFERENCIAS.....	45
APENDICE (ANEXOS).....	47
A CURVAS DE CALIBRACIÓN.....	47
A1 CURVA DE CALIBRACION DEL Au(III).....	47
A2 CURVA DE CALIBRACION DEL Pd.....	48
A3 CURVA DE CALIBRACION DEL Pt.....	48
A4 CURVA DE CALIBRACION DEL Cu.....	49
B ESPECTROS DE ABSORCIÓN.....	50
B1 Espectro de absorción de Au.....	50
B2 Espectro de absorción de Pd.....	51
B3 Espectro de absorción de Pt.....	52
B4 Espectro de absorción de Cu.....	53

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 HISTORIA DEL ORO

La historia del oro es tan rica y compleja como el mismo metal. Las guerras han sido peleadas por él, el amor se ha declarado con él. Antiguos jeroglíficos egipcios muestran al oro como el brillo del sol, modernos astrónomos usan espejos con una cubierta de oro para capturar imágenes de los cielos. El oro se usa como patrimonio nacional y es guardado en bóvedas de los bancos mundiales.

En el año 323 a.C. los griegos tenían minas de oro desde Gibraltar hasta Asia Menor; en 1848 James Marshall encontró pepitas de oro mientras se construía un aserradero cerca de Sacramento y así comenzó la fiebre del oro en California. La primera fundición del metal data del año 3600 AC, los egipcios usaban la fundición para separar metales. Los primeros registros del uso del oro como joyería datan del año 2600 a.C. al encontrarse restos en antiguas tumbas en la región de la antigua Mesopotamia, ahora Irak.

En el año 600 a.C. el primer uso odontológico del oro fue como asegurador de dientes postizos usando hilos de oro. En el año 300 los romanos comenzaron a usar polvo de oro y fundirlo junto con el cristal soplado para darle al cristal un color rojo luminoso.

En 1803 el primer experimento en galvanoplastia con oro es llevado por el profesor Luigi Brugnatelli en la universidad de Pavía, la galvanoplastia de oro mejora la conductividad de un material, ahora este hecho es muy esencial en tecnologías del siglo 21.

En 1961 es usado como alambre de unión en microchips diseñados en los Laboratorios Bell en los E.U. Hoy en día, literalmente, miles de millones de chips se unen de esta manera todos los años, usado en el control de todo tipo de aparatos eléctricos indispensables, desde celulares hasta computadoras. También en el mismo año se usó oro como protector de instrumentos sensibles a la radiación en el primer vuelo espacial tripulado. En el año de 1980, 41 kilogramos de oro fue incluido en la construcción del transbordador espacial a través de las aleaciones de soldadura, fabricación de pilas de combustible y los contactos eléctricos.

El oro ha sido utilizado en el área de la medicina, en 1985 la gigante farmacéutica SmithKline y French desarrolla Auranofin, una droga basada en oro para el tratamiento de la artritis reumatoide, esta droga fue aprobada y puesta en venta en ese año.

Así mismo Boston Scientific en el año 2001 desarrolló el primer stent chapado con oro (NIROYAL), este es un dispositivo tubular usado en cirugía de corazón, el cual se inserta en las venas y arterias como soporte para abrir los vasos sanguíneos y permitir un flujo adecuado. Un hecho más reciente, en el 2011 el oro ha sido usado en convertidores catalíticos por una importante fabricante europea de automóviles diesel. Este fue el primer uso de oro para el control de emisiones de los autos [1].

1. 2 QUÍMICA DESCRIPTIVA DEL ORO

Es un metal de color amarillo característico con un alto brillo. El oro puro es el más maleable y dúctil de todos los metales. Pueden obtenerse láminas (panes de oro) de 0,000013 cm de espesor y con 29 g del metal se puede hacer un cable 100 Km de longitud. Es uno de los metales más blandos y es un buen conductor del calor y la electricidad.

El oro finamente dividido, como otros polvos metálicos, es negro y sus suspensiones coloidales tienen toda la gama de colores entre el rubí y el morado.

En la tabla1, se indican las propiedades físicas y químicas del oro [2].

Tabla1. Propiedades físicas y químicas del oro.

Masa Atómica	<u>196,96655 uma</u>	Calor de Atomización	<u>366,0 kJ/mol de átomos</u>
Punto de Fusión	<u>1337,58 K</u>	Estados de Oxidación	<u>+1, +3</u>
Punto de Ebullición	<u>3080 K</u>	Afinidad Electrónica	<u>222,7 kJ/mol</u>
Densidad	<u>19320 kg/m³</u>	Radio Atómico	<u>1,44 Å</u>
Dureza (Mohs)	<u>2,8</u>	Radio Covalente	<u>1,34 Å</u>
Potencial Normal de Reducción	<u>+ 1,50 V Au³⁺ Au</u>	Radio Iónico	<u>Au⁺¹ = 1,37 Å</u> <u>Au⁺³ = 0,90 Å</u>
Conductividad Térmica	<u>318,00 J/m s °C</u>	Volumen Atómico	<u>10,2 cm³/mol</u>
Conductividad Eléctrica	<u>446,4 (mOhm.cm)⁻¹</u>	Polarizabilidad	<u>6,1 Å³</u>
Calor Específico	<u>129,58 J/kg °K</u>	Electronegatividad (Pauling)	<u>2,54</u>
Calor de Fusión	<u>12,7 kJ/mol</u>		
Calor de Vaporización	<u>343,0 kJ/mol</u>		

El oro es un metal inactivo. Es inalterable por el aire, el calor, la humedad y la mayoría de los agentes químicos, aunque se disuelve en mezclas que contienen cloruros, bromuros o

yoduro. También se disuelve en otras mezclas oxidantes, en cianuros alcalinos y en agua regia. El agua regia es una mezcla de ácido nítrico y clorhídrico en proporción 1:3. Los cloruros y los cianuros son los compuestos más importantes de oro [2].

EL oro se puede alea con otros metales para darle características especiales. En su forma pura, tiene un lustre metálico y es amarillo brillante, pero cuando es mezclado o aleado con otros metales, tales como plata, cobre, cinc, níquel, platino, paladio, telurio y el hierro, crea otras tonalidades del color que se extienden del plata-blanco al verde y del naranja al rojo.

Los tonos blancos han sido hechos tradicionalmente aleando el níquel, el cinc y el cobre con el oro, pero más recientemente la plata y el paladio han substituido al cinc. Estos tratamientos de variaciones de color se utilizan sobre todo en joyería.

La fineza del oro es un término metalúrgico que indica la pureza del oro y se expresa en partes por 1.000. Las monedas y las barras de oro tienen una fineza de 999,9 porciones por 1.000. La pureza en un artículo o la cantidad de oro en una aleación, se mide con una unidad llamada un quilate. Un artículo fino o puro es de 24 quilates. En el de pocos quilates por ejemplo, un artículo de 18 quilates contiene $18/24$ (o $3/4$) partes de oro fino [3].

1. 3 PROPIEDADES Y USOS

El oro es usado en un amplio rango de tecnologías. En cada una de las aplicaciones que éste es usado, el oro provee un rendimiento excepcional a causa de sus propiedades técnicas únicas, esto combinado con su resistencia a la corrosión y sus altas propiedades de maleabilidad y ductilidad. El oro es también un material utilizado en la medicina y odontología debido a su biocompatibilidad, y en años recientes se ha visto como pieza clave en nanomateriales.

PROPIEDADES

-Conductividad:

La capacidad para transportar eficientemente el calor y la electricidad es una característica del oro, haciéndolo imprescindible en la electrónica moderna. Su conductividad eléctrica es superada sólo por el cobre y la plata, pero a diferencia de estos metales, el oro no se deslustra, por lo que es el más confiable de los metales conductores.

-Resistencia a la corrosión:

La resistencia a la corrosión del oro es una de las propiedades más útiles. Generalmente la única sustancia que puede corroer al oro es una mezcla de ácidos nítrico y clorhídrico (agua regia), y el uso continuo del oro no lo deslustra. Esta cualidad hace al oro ideal para su uso como cubierta de contactos y conectores en circuitos eléctricos en los que se requiere el contacto íntimo entre dos superficies de metal para garantizar la conexión eléctrica.

-Maleabilidad:

El oro es un material extremadamente maleable. El oro puro puede ser martillado hasta formar una capa traslúcida de 0.000013 cm de grosor. Es posible lograr que una onza de oro cubra una superficie de 9 metros cuadrados con un espesor de 0.000018 cm.

-Ductilidad:

El oro es muy dúctil y una onza se puede estirar tanto para crear un cable fino de 5 micras de diámetro y llegar a medir 80 km de largo. Esta propiedad es útil en la producción de cable de unión usado en componentes electrónicos.

-Biocompatibilidad:

El oro ha demostrado excelente biocompatibilidad con el cuerpo humano, razón por la cual se ha usado en odontología y en material de uso quirúrgico y médico. Además posee un alto grado de resistencia para propagación de bacterias, lo cual hace que este material sea elegido para implantes que tengan riesgo de infección como en prótesis auditiva.

-Catálisis:

Un catalizador es una sustancia o material que acelera la velocidad de una reacción química sin ser consumido por la reacción. Los catalizadores son un componente esencial de muchos procesos industriales diferentes utilizados para producir productos químicos, productos alimenticios y otros materiales. El oro es un catalizador activo para muchas reacciones de importancia comercial y su uso en este campo va en aumento.

-Nanotecnología:

Las propiedades del oro a nivel nano partículas son muy diferentes de las propiedades del oro a mayor escala. Las propiedades únicas del oro en nanoescala están siendo principalmente usadas en un creciente número de aplicaciones.

USOS:

A causa de su relativa escasez, el oro se usa como base para transacciones monetarias internacionales.

-Joyería:

Se utiliza en monedas y joyas aleada con otros metales para darle la dureza necesaria.

-Electrónicos:

El oro es el material seleccionado en muchas aplicaciones de la electrónica, especialmente en telecomunicaciones, transportación, tecnologías de la información y en otras aplicaciones.

Cuando el circuito es complejo y el requerimiento de fiabilidad es alto, el oro es la elección preferida. Las propiedades benéficas de este material incluyen su alta resistencia a la corrosión, maleabilidad, ductilidad y su alta conductividad térmica y eléctrica.

Solamente la plata y el cobre son mejores conductores de la electricidad pero estos no son comparables con su resistencia a la corrosión.

Donde es indispensable la resistencia a la corrosión es común preferir el uso de oro o alguna de sus aleaciones. En electrónicos la resistencia a los efectos ambientales también es una cualidad importante.

La implementación del oro en electrónicos es el principal uso en tecnología. En 2011, se uso en electrónicos cerca de 320 toneladas de oro. Un típico dispositivo móvil puede contener hasta cerca de 50 mg de oro.

-Aeroespacial:

La capacidad de reflexión del oro, la conductividad y la resistencia a la corrosión han jugado un rol importante en la exploración espacial por décadas. Su eficiencia como un reflector de calor y radiación infrarroja ha sido invaluable para numerosas empresas de la NASA. Una película plástica recubierta con oro protege a los equipos de las intensas radiaciones solares y del calor.

Similar a esto una capa de oro en los cascos de los astronautas defiende contra las letales radiaciones mientras se está en el espacio [1].

Un telescopio de espejos parabólicos recubiertos de oro abordo de la Mars Global Surveyor ayudó a mapear la totalidad de la superficie de Marte durante un período de dos años.

Recubrimientos de oro también protegen el telescopio Hubble de un valor de \$ 1.5 mil millones contra la corrosión y en las conexiones eléctricas.

-Automovilismo:

El uso de oro en convertidores catalíticos en carros, camionetas y vehículos pesados, han servido para disminuir emisiones nocivas y por tanto reducir la contaminación del aire. El oro utilizado como un catalizador para vehículos diesel ha permitido cumplir con los más estrictos índices reglamentados en Europa para emisiones y así se ha instalado a la fecha en miles de vehículos por todo el mundo.

-Medicina:

El uso del oro en medicina y odontología data de miles de años atrás. La resistencia a la corrosión única del oro ha sido asociada con dioses, la inmortalidad y salud a través de los años.

El más antiguo uso del oro fue hecho por los chinos 2500 años A. C. Desde entonces numerosas culturas han utilizado medicinas basadas en oro para tratamientos de varias condiciones incluyendo viruela, úlceras en la piel y el sarampión.

En medicina se ha vendido en tratamientos para la artritis reumatoide. En recientes años se ha investigado en el tratamiento del cáncer con algunos compuestos del oro. También ha sido un reciente tratamiento para cáncer de próstata el uso de granos de oro del tamaño de granos de arroz.

Algunos doctores también usan implantes de oro puro para el tratamiento de parálisis facial.

El isótopo Au-198 se usa como fuente de radiación en la investigación biológica y en el tratamiento del cáncer.

-Ingeniería:

El uso del oro en ingeniería y tecnología ha evolucionado en los últimos años en múltiples aplicaciones. Se utiliza como material lubricante, revestimiento en vidrio arquitectónico en edificios, en celdas de combustible y motores de reacción [1].

-Otros usos:

También se usa en forma de pan de oro en el dorado y rotulado artístico.

1. 4 COMPLEJACIÓN DE IONES METALICOS

Los complejos metálicos o compuestos de coordinación son compuestos de metales con moléculas o grupos aniónicos, llamados ligantes. Los metales más comunes en estos compuestos son los de transición, por ejemplo, Fe, Cu, Ni, Pt ,etc. y los ligantes se caracterizan por poseer átomos con pares de electrones libres, tales como el H₂O, NH₃, CN⁻, OH⁻, Cl⁻, etilendiamina y muchos más.

La complejación de iones metálicos en la fase acuosa es un factor esencial en extracción de metales por solvente, de tal forma que la complejación puede proveer una diferencia suficiente en la extrahibilidad para permitir la separación de metales. Metales preciosos como la plata y el oro son extraídos de sus complejos cianurados por tratamiento con zinc.

1.4.1 COMPLEJOS DE ORO

El oro forma diferentes complejos pero pocos compuestos sencillos.

El Au(I) forma un complejo estable como el anión lineal [Au (CN)₂]⁻. El óxido Au₂O₃ se obtiene, como precipitado amorfo, Au₂O₃.nH₂O, de color marrón, en medio alcalino a partir del halurocomplejo cuadrado plano [AuCl₄]⁻.

El Au₂O₃ cristalino, polímero monodimensional, se obtiene mejor por vía hidrotermal y su estructura se genera con grupos planocuadrados [AuO₄] unidos por vértices, es poco estable como es de esperar y se descompone en Au y O₂ a 150 °C.

La cloración de polvo de oro a 200 °C forma moléculas diméricas planas de Au₂Cl₆, cuando se calienta a 160 °C forma el AuCl. Se conocen los tres monohaluros AuX (X = Cl, Br, I) cuya estructura se define por cadenas en zigzag,...X-Au-X..., con puentes angulares Au-X-Au de 72° a 90°.

El ion dicianoaurato [Au (CN)₂]⁻ de gran importancia metalúrgica se forma con facilidad cuando se hace reaccionar oro con disolución de cianuro en presencia de aire o agua oxigenada.

El Au (III) es d⁸ e isoelectrónico, teniendo sus complejos preferencia por la geometría cuadrada plana.

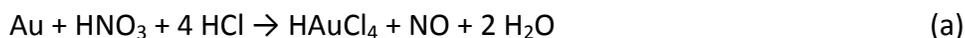
La disolución de oro en agua regia o del Au_2O_3 en ácido clorhídrico concentrado forma el ión tetracloroaurato (III), $[\text{AuCl}_4]^-$, que se usa como "oro líquido" para decorar cerámicas y vidrios, ya que cuando se calienta nos deja una película de oro.

La evaporación de estas disoluciones nos dan cristales amarillos de $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ y su disolución acuosa genera un medio fuertemente ácido. Este anión, $[\text{AuCl}_4]^-$, se hidroliza fácilmente a $[\text{AuCl}_3\text{OH}]^-$.

El "tricloruro de oro" (AuCl_3) y el "ácido cloroáurico" ($\text{HAuCl}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) son algunos de los compuestos más comunes de oro [4, 5].

1. 4.2 ÁCIDO CLOROÁURICO

El ácido cloroáurico es un compuesto inorgánico de fórmula HAuCl_4 . Este es un sólido en forma de cristales de color naranja-amarillo, es un común precursor para otros compuestos de oro y un intermedio en la purificación de oro metálico. Es producido por la disolución de oro en agua regia, seguido de una cuidadosa evaporación de la solución:



Bajo algunas condiciones el oxígeno puede ser usado como el oxidante. Alternativamente una solución de HAuCl_4 puede ser producido por electrolisis de oro metálico en ácido clorhídrico:



Este método es usado en la refinación de oro.

También puede obtenerse una solución de HAuCl_4 por la acción del cloro y del ácido clorhídrico en el oro metálico:



Esta reacción es mayormente usada en la extracción de oro de componentes electrónicos y otros materiales ricos en este metal [6].

La extracción líquido-líquido se emplea para la recuperación, concentración, purificación y determinación analítica de oro. El sistema de mayor importancia es la extracción de HAuCl_4 de medios hidroclorhídricos por extractantes que contengan oxígeno, como por ejemplo, alcoholes, cetonas, éteres y ésteres. Los extractantes más utilizados para este propósito son el dibutil glicol, metil isobutil cetona, tributil fosfato y diclorodietileter (Clorex).

1. 5 EXTRACCIÓN POR SOLVENTE EN HIDROMETALURGIA

El uso de extracción por solvente como una operación unitaria en hidrometalurgia se extiende a un amplio rango de metales, desde una variedad de materiales incluidos minerales de bajo grado, desechos y desperdicios, y diluciones en soluciones acuosas. Esta tecnología fue pionera en el año 1940 por la extracción de uranio de minerales y posteriormente para la recuperación de uranio y plutonio del combustible gastado de los reactores (energía nuclear), y hasta la fecha se sigue usando para este propósito.

El conocimiento obtenido llevó al desarrollo de procesos hacia la recuperación de otros metales valiosos y la separación de elementos tales como las tierras raras, zirconio-hafnio y niobio-tantalio. También la extracción por solvente se ha estado utilizando para la recuperación de metales menos valiosos pero muy importantes como níquel y cobalto.

La extracción líquido-líquido es ahora una alternativa económica a la pirometalurgia para extracción de metales, especialmente cuando la concentración del metal en los minerales es pequeña y el proceso de fundición no es adecuado y difícil [7].

1.5.1 EXTRACCIÓN DE METALES PRECIOSOS

La tradicional ruta para extracción y separación de metales preciosos consistía en una serie de disoluciones selectivas y pasos de precipitación que generalmente eran ineficientes en términos del grado de separación que se podía obtener. Incluso cuando las condiciones permitían la completa precipitación del elemento deseado de la solución, el precipitado seguía estando contaminado por una cantidad de licor madre, que requería entonces un intenso lavado, el cual generalmente arrastraba en los lavados una pequeña cantidad de ese valioso elemento.

Consecuentemente, esto requería múltiples pasos de precipitación y redisolución para llegar a una pureza deseada, así llevando muchas etapas de recirculación y de tratamiento. Esto hacía mucho más alto el valor del metal cuya pureza se quería.

Los metales preciosos son considerados metales nobles, y como tales, son difíciles de disolver. El usual agente lixivante es el ácido clorhídrico, con la adición de clorato para incrementar el potencial de oxidación [7].

Un resumen de los más importantes cloro complejos encontrados en estas soluciones lixiviantes se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Principales cloro especies de metales preciosos.

Metal	Estado de oxidación	Principales Cloro especies	Comentarios
Plata(Ag)	I	AgCl	Insoluble
Oro(Au)	I	AgCl ₂ ⁻	Alta concentración de HCl
	III	AuCl ₂ ⁻	Muy estable
Platino (Pt)	II	AuCl ₄ ⁻	Conversión IV a II lenta
	IV	PtCl ₄ ²⁻	Principal especie, cinéticamente inerte
Paladio (Pd)	II	PtCl ₆ ²⁻	Principal especie
	IV	PdCl ₄ ²⁻	Difícil conversión de II a IV
Iridio (Ir)	III	PdCl ₆ ²⁻	Ambas especies son estables y con fácil conversión IV a III
	IV	IrCl ₆ ³⁻	
Rodio (Rh)	III	IrCl ₆ ²⁻	
Rutenio (Ru)	III	RhCl ₆ ³⁻	Complejo equilibrio entre III y IV, dependiendo del potencial redox y concentración de cloruro
	IV	RuCl ₆ ³⁻	
Osmio (Os)	III	RuCl ₆ ²⁻	
	IV	OsCl ₆ ³⁻	Os (IV) más estable que Ru(IV)

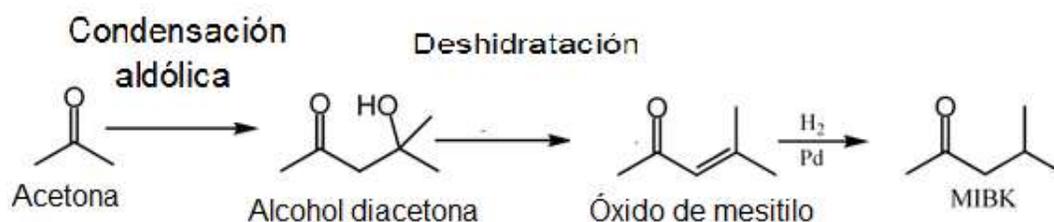
1.5.2 EXTRACCIÓN DE ORO

El oro que existe en soluciones lixiviadas aparece como la especie [AuCl₄]⁻ y todos los procesos se basan en la extracción de este ión o el ácido correspondiente (HAuCl₄) por un par iónico o por solvatación con diversos extractantes, respectivamente.

Los recientes estudios de Morris y Khan [16] han mostrado el uso del dibutilcarbitol (di etilenglicol dibutil éter) por INCO en la recuperación de oro. Este extractante tiene una alta selectividad por el oro (figura 1) y la coextracción de los otros elementos se realiza mediante un lavado con una disolución en ácido clorhídrico. A causa del alto coeficiente de distribución del oro, su recuperación se realiza por reducción química con ácido oxálico a 90° C y filtrado como granos de oro. Sin embargo su lenta cinética hace necesario un proceso batch.

Un extractante alternativo es el 4-metil-2-pentanona (metil isobutil cetona; MIBK) usado por la Matthey Rustenberg Refiners (MRR). La MIBK tiene una menor selectividad por el oro (figura 2), así que un simple lavado ácido no es suficiente para remover las impurezas, sin embargo, existe una ventaja cuando algunos de los elementos, tales como el telurio, arsénico y hierro, se han eliminado en etapas anteriores. De nuevo la recuperación del oro es por reducción química.

Fabricación de MIBK:



Algunas sales amoniacales pueden ser también usadas para extraer especies aniónicas, pero en general estas son menos selectivas para el oro [7].

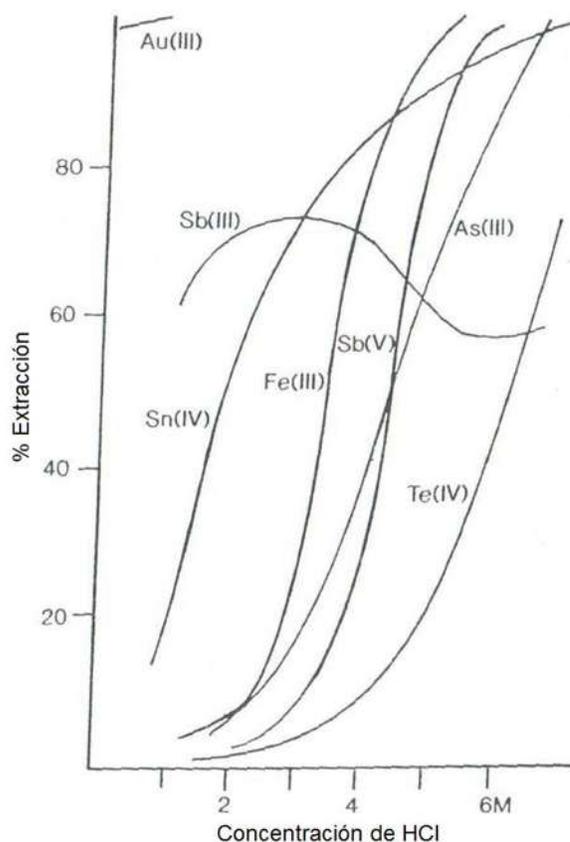


Fig. 1 Extracción de metales de medios de HCL usando dibutilcarbitol.

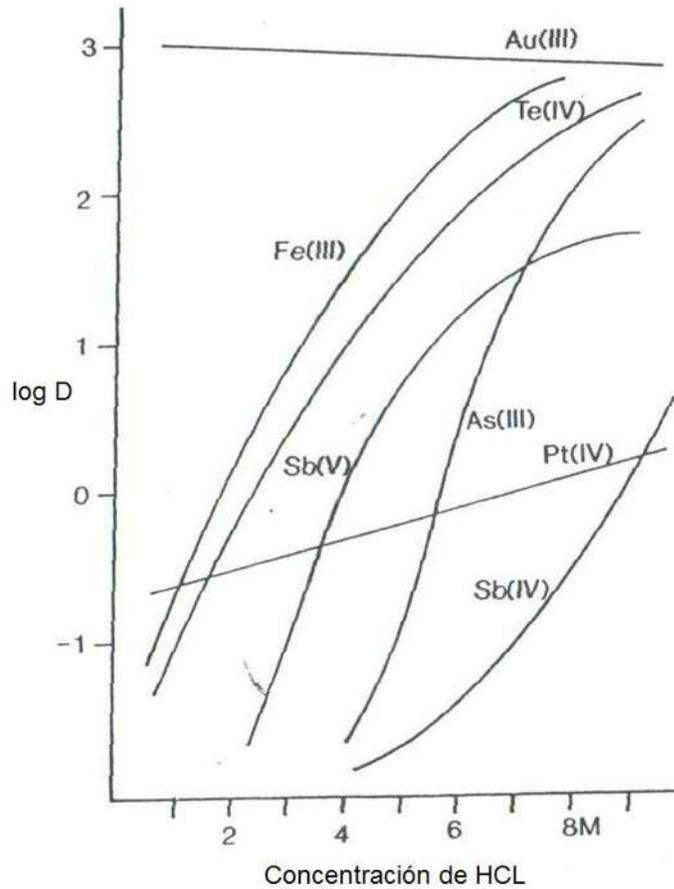


Fig 2 Extracción de metales de medios de HCl usando MIBK.

1. 6 ESTUDIOS SOBRE EXTRACCIÓN LIQ-LIQ PARA SEPARAR ORO

Los siguientes métodos son algunos de los estudios referentes a la recuperación de oro por extracción por solventes.

- **Cianuración de oro.**

La cianuración del oro (también conocida como el proceso de cianuro o el proceso de MacArthur-Forrest) es una técnica metalúrgica para la extracción de oro de mineral de baja calidad, convirtiendo el oro en iones complejos metálicos aurocianurados solubles en agua. Es el proceso más comúnmente utilizado para la extracción de oro.

Debido a la naturaleza venenosa del cianuro, el proceso es muy controvertido y su uso está prohibido en varios países y territorios [8].

La reacción química se denomina como ecuación de Elsner y se representa:



Se trata de un proceso electroquímico en el que el oxígeno recoge electrones del oro en una zona catódica, mientras los iones de oro, son rápidamente acomplejados por el cianuro alrededor de la zona anódica para formar el cianocomplejo soluble.

- **Extracción de oro en Nigeria de lixiviados de ácido clorhídrico de menas de oro con tributilfosfato.**

Baba et al [9], presentan un estudio experimental de la cinética de disolución y extracción por solventes de oro depositado en un mineral de Ijero-ekiti (Nigeria) por lixiviación con ácido clorhídrico seguido de una extracción con tributilfosfato (TBP) disuelto en keroseno.

La investigación del lixiviado muestra que la disolución del mineral en HCl se incrementa con el aumento de la concentración del ácido, temperatura y con la disminución del diámetro de partículas a una velocidad de agitación de 300 rpm.

Los datos cinéticos han sido analizados y se encontró que sigue el mecanismo de difusión de control con la reacción química de la superficie como en la etapa límite. Cerca del 81.27% de los iniciales 10 g/L de la concentración del mineral fue disuelta dentro de 120 minutos por una solución de HCl 2 M a 80°C usando un diámetro de partículas desde 0.09 hasta 0.12 mm.

Consecuentemente el estudio de la extracción por solventes reveló que la eficiencia de extracción fue del 85.28% usando TBP en keroseno. Este fue determinado del análisis del complejo de oro por espectrofotometría de absorción atómica [9].

- **Refinación de oro por extracción por solventes – proceso Minataur™ [10]**

El proceso Minataur™ (Mintek Alternative Technology For Au Refining) es una novedosa ruta para la producción de oro de alta pureza usando la extracción por solventes. La implementación comercial de este proceso representa no solamente un avance significativo de las tecnologías de refinación del oro, sino también debe ser un instrumento para iniciar importantes cambios en la legislación que regula el mercado del oro en Sudáfrica.

El oro ya sea al 99.99% o 99.999% de pureza puede ser producido a partir de productos intermedios del proceso que tienen una amplia gama de contenidos de oro.

El proceso comprende la lixiviación oxidativa de la alimentación sólida, continuando con la extracción selectiva de oro del licor lixiviado para eliminar impurezas y la posterior precipitación de polvo puro de oro.

Se reportan los resultados de 2 plantas piloto de prueba en las cuales se producen 5 kg/d de oro con alta pureza en la refinación anódica de plata y electrodeposición catódica de oro, y provee algunos detalles de costo y beneficios [10].

Las ventajas del proceso MINATAUR por encima de tecnologías de electrorefinación incluyen la disminución significativa del tiempo de residencia del oro, el fácil control y operación, y la habilidad para producir oro con una alta pureza dentro del circuito. El proceso es particularmente atractivo para materiales que contengan cantidades significativas del metal.

1.7 IMPORTANCIA DE LA RECUPERACIÓN DE ORO EN MATERIAL DE DESECHO ELECTRONICO

Los residuos o desechos de electrónicos consisten básicamente de componentes de computadoras como circuitos impresos, tarjetas electrónicas, electrodomésticos, celulares, equipos de audio, etc.

En estas fuentes el oro se encuentra distribuido en las placas o circuitos impresos de las computadoras como una capa de oro depositada sobre un sustrato de un metal menos noble como níquel y/o cobre insertados a su vez en una base polimérica. El oro presente en dichas placas impresas es de gran interés comercial, ya que llega a estar presente desde 0.1 a 0.5 gramos de oro por cada circuito impreso [11].

Al año se desechan millones de computadoras y componentes electrónicos tan solo en México y estudios demuestran que cerca del 90 % de estos desechos se depositan en vertederos, se incineran o bien se recuperan sin ningún tipo de pretratamiento. Por eso se considera de gran importancia el estudio de nuevas prácticas de recuperación y reciclado de estos desechos. Esto ayudaría a disminuir el desperdicio innecesario de gran parte de sus componentes, y la recuperación de metales valiosos que pueden ser reutilizados, además ayudaría a disminuir las importaciones anuales de metales preciosos que se requieren para las aplicaciones eléctricas y electrónicas.

1.8 JUSTIFICACIÓN

Debido a la importancia de recuperar el oro por su gran valor, científicos e ingenieros han estado investigando en los últimos años, nuevos y mejores métodos para su extracción y recuperación, ya sea, de minerales de baja calidad o de desechos de electrónicos, esto nos ha llevado a la inquietud de investigar y estudiar las propiedades de un nuevo extractante como es el decanol, para la separación de Au(III) por medio de extracción líquido-líquido.

1.9 OBJETIVOS

1.9.1 OBJETIVO GENERAL

-Estudiar las propiedades como agente extractante del decanol para Au(III) en medios concentrados de HCl.

1.9.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

-Evaluar la eficiencia de extracción para la separación de oro con decanol disuelto en un solvente orgánico.

-Establecer las mejores condiciones de trabajo para la extracción del metal en función de la composición de las fases y de los rendimientos de extracción.

-Optimizar el sistema de extracción metal-extractante-disolvente a través del estudio de la influencia de factores tales como: pH de la fase acuosa, concentración del ácido y del extractante, naturaleza del disolvente y tiempo de agitación.

-Caracterizar la especie extraída mediante el análisis gráfico de la figura del log D vs log [decanol].

-Establecer la selectividad del decanol para separar el oro respecto al cobre, paladio y platino.

-Implementar la metodología analítica por Espectrofotometría UV-VIS (Ultravioleta-Visible) para los metales de estudio.

1.10 HIPÓTESIS

Estudios demuestran que el porcentaje de extracción de un elemento varía con respecto a la concentración del medio ácido y del extractante; por lo tanto, esperamos un comportamiento similar de la extracción del oro con el decanol como extractante, con respecto a la variación de la concentración de ácido clorhídrico y de la concentración del decanol en la fase orgánica.

El extractante decanol tendrá buena selectividad hacia el oro con respecto a otros metales frecuentemente asociados a él.

También podemos suponer que la extracción tendrá una cinética rápida debido a la naturaleza del extractante.

CAPITULO II

GENERALIDADES O MARCO TEÓRICO

2.1 EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO

La extracción líquido-líquido también conocida como extracción por solventes consiste en la distribución de un soluto entre dos fases líquidas inmiscibles entre sí que están en contacto una con la otra. Científicos e ingenieros han utilizado este proceso en investigación y a nivel industrial para la separación de mezclas [7].

El principio está ilustrado en la figura 3. Un embudo de separación contiene dos capas de líquidos, una que es generalmente una fase acuosa (F_{aq}), y la otra, un solvente orgánico o fase orgánica (F_{org}). En el ejemplo se muestra que la fase orgánica tiene una densidad menor que la fase acuosa, pero también la situación invertida puede ser posible. Un soluto A, el cual inicialmente estaba disuelto exclusivamente en uno de los dos líquidos, eventualmente se distribuye en las dos fases en contacto. Cuando se alcanzan condiciones de equilibrio, la distribución del soluto A entre las fases, determina una concentración $[A]_{aq}$ en la fase acuosa y una concentración $[A]_{org}$ en la fase orgánica. La relación de las concentraciones se expresa como el coeficiente de distribución del soluto de la siguiente manera:

$$D = \frac{[A]_{org}}{[A]_{aq}} \quad (3.1)$$

El coeficiente de distribución (D) se define como “la relación de la concentración total de la sustancia en la fase orgánica con respecto a su concentración en la fase acuosa”, medida en el equilibrio, y no depende de si la fase orgánica es la fase ligera o pesada.

Si hay más de un soluto en la mezcla se representarán los diferentes coeficientes de distribución como D_A , D_B , D_C , etc.

Si D_B es muy diferente de D_A , A y B pueden ser separados por extracción líquido-líquido. D es también llamado coeficiente de reparto o razón de distribución.

La extracción por solventes es también usada en numerosas industrias químicas para producir componentes químicos puros, que van desde las industrias farmacéuticas y biomédicas a la recuperación de sustancias orgánicas y metales pesados, utilizada también en química analítica, en purificación de emisiones ambientales y en investigación. Su correcta aplicación requiere de conocimientos básicos de química orgánica, química inorgánica y la fisicoquímica [7].

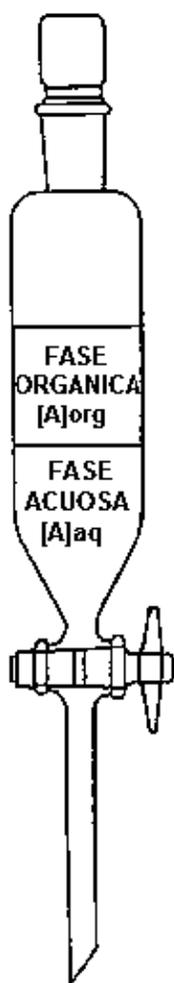


Fig. 3 Una representación esquemática de extracción líquido-líquido. Un soluto A está distribuido entre la fase superior, por ejemplo un solvente orgánico, y la fase inferior, una fase acuosa.

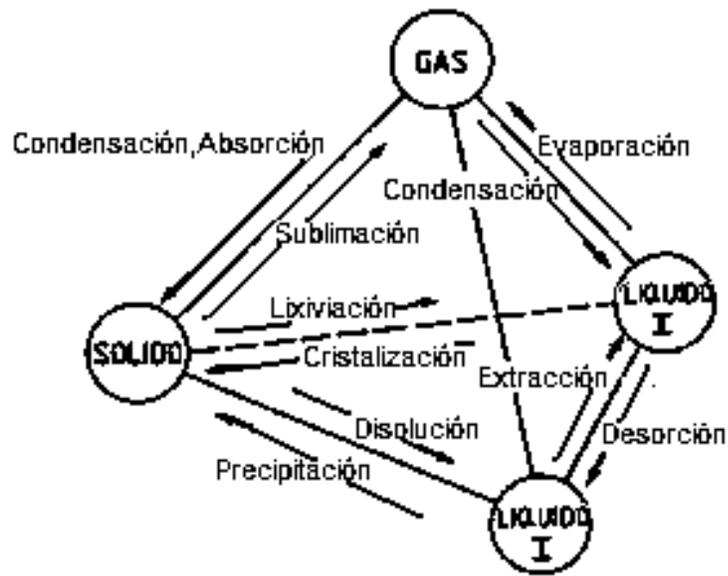


Fig. 4 Modelo de un sistema de cuatro fases que consiste de dos fases líquidas en equilibrio (inmiscibles una de otra) con una fase gas y una fase sólida.

2.1.1 CONCEPTO DE FASE ORGÁNICA Y EXTRACTANTE

FASE ORGÁNICA

La mayoría de las personas están familiarizadas en que algunos líquidos orgánicos (keroseno, éter, benceno entre otros) tienen la característica de ser parcial o totalmente inmiscibles con el agua. Esta carencia de miscibilidad permite un equilibrio entre dos líquidos que están separados por una capa límite común entre ellas. En consecuencia el sistema convencional de tres fases (líquido, gas, sólido) es expandido a cuatro fases, donde dos líquidos inmiscibles están involucrados. Esto se muestra en la figura 4 y como estas relaciones hacen posible los procesos de separación de las diferentes fases [12].

La fase orgánica suele estar formada por tres componentes:

-El diluyente: Es un compuesto no polar e inmiscible en agua, barato, que sirve para disolver al extractante. Las características deseadas del diluyente son:

- Disolver al extractante.
- Inmiscibilidad con la fase acuosa.
- Presentar una viscosidad baja de la disolución orgánica para permitir un buen mezclado, rápida reacción y evitar la formación de emulsiones con la fase acuosa que permanezcan estables.
- Los disolventes de extracción no deben reaccionar con los componentes del sistema y deben de ser fáciles de recuperar por destilación. No tóxicos.
- Estabilidad química frente a las condiciones del proceso.
- Barato.

Los disolventes más usados son: keroseno, hexano, benceno (no se usa actualmente por ser cancerígeno), cloroformo y tetracloruro de carbono

-El extractante: Es un compuesto que reaccionará con el metal a extraer. Las características deseadas del extractante son:

- Capacidad de extraer el soluto con un elevado coeficiente de distribución.
- Selectivo frente a impurezas.
- Facilidad para la reextracción
- Baja solubilidad en la fase acuosa.
- Soluble en el diluyente orgánico.
- Estable frente a condiciones de proceso (extracción, limpieza, regeneración, reuso,..)
- Baja toxicidad.
- Costo.

Los principales extractantes usados son: aminas, cetonas, alcoholes, éteres, esteres, alquilfosforicos, extractantes nitrogenados, ácidos fosfóricos y carboxílicos.

La tabla 3 muestra algunos extractantes comerciales para la extracción de metales usados en la hidrometalurgia [13].

Tabla 3: *Extractantes comerciales en la extracción de metales en hidrometalurgia.*

<u>Nombre comercial</u>	<u>Nombre químico</u>
Alamine	Tricaprilamina
Cyanex 272	Ácido di-2,4,4 - trimetil - Pentil fosfínico
Cianex 301	Ácido bis/2,4,4 - trimetil - gentil fosfino ditioico
Cianex 302	Ácido bis (2,4,4 - Trimetil - pentil) Monotiososfinico
DBBP	di - butil - butil fosfato
D2EHPA	Ácido di - 2 - etil - hexil fosfórico
EHEHPA	Ácido di-2-etil-hexil fosfónico-mono-2etil-hexil-éster
HDDNS	Ácido di - dodecil naftalensulfónico
Hostarex Dk – 16	C16H22O2
Kelex 100	8 hidroxiquinoleína
Lix 54	Fenil - alquil β - dicetona
Lix 70	Oxima de 2 - hidroxil - 3 cloro - 5 - nonil benzofenona
MIBK	Metil - iso - butil - cetona
NPPA	Ácido nonil fenil fosfórico
SME 529	Oxima de 2 - hidroxil - 5 - nonil acetofenona
TBP	Tri - butil fosfato
TNOA	Tri - n - Octilamina
TOPO	Óxido de tri - n – Octilfosfina

-Los modificadores: Sirven para evitar la reacción de otros solutos con el extractante, o para incrementar la eficiencia de la extracción. Por lo tanto, son compuestos que o bien aumentan la solubilidad del extractante en el diluyente, aumentando de este modo la extracción, o bien modifican la tensión superficial y con ello disminuyen las pérdidas de adsorción entre las fases, para que se separen mejor y no haya pérdidas por arrastre de la fase orgánica con la fase acuosa [12]. El resultado final es un incremento de la extracción. Con algunos modificadores se puede conseguir la selectividad de extracción entre dos cationes. Los más conocidos y empleados son:

- Alcoholes de cadena larga cuando el extractante son aminas.
- TBP (fosfato de tributilo) y/o TOPO (óxido de trioctilfosfina) cuando el extractante es un ácido alquilfosfórico.

2.1.2 PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN

Para determinar si una extracción es viable o no, un parámetro que comúnmente se usa, es el concepto de porcentaje de extracción (%E), el cual se define como la fracción del total del soluto o metal a extraer que se ha podido separar de la fase acuosa.

Matemáticamente se expresa como:

$$\%E = \frac{C_{Aorg}}{C_{Ai}} = \left[\frac{C_{Ai} - C_{Aaq}}{C_{Ai}} \right] * 100 \quad (3.2)$$

Donde:

C_{Ai} = concentración inicial del soluto (antes de la extracción).

C_{Aaq} = concentración del soluto en la fase acuosa.

C_{Aorg} = concentración del soluto en la fase orgánica.

El porcentaje de extracción depende generalmente de la concentración del soluto en la fase acuosa, la concentración del medio aniónico, la concentración del extractante, el pH y la temperatura. Con respecto a la concentración del medio (ácido) generalmente, mientras más concentrado sea, mayor será la extracción del soluto.

Los solutos tienen diferentes solubilidades en diferentes líquidos debido a las variaciones de las fuerzas de interacción de las moléculas del soluto con las del solvente. Consecuentemente, en un sistema de dos solventes parcial o totalmente inmiscibles, diversos solutos tienen una distribución diferente entre las dos fases. Esta es la base para la aplicación de la extracción líquido-líquido. En este contexto, uno de los líquidos casi siempre significa invariablemente solvente orgánico.

Esta irregular distribución se describe en la figura 5 en la cual se muestra el porcentaje de extracción de diferentes metales con una mezcla de extractante y modificador disueltos en keroseno. Se observa que los metales Mo, Zn y Fe (III) son fácilmente extraídos a una baja concentración de cloruros en medio ácido, mientras que el Cu, Co, Fe (II) y Mn se extraen a una concentración intermedia, y aún a una alta concentración no se ha podido extraer el Ni y Cr. Esta característica se usa industrialmente para separar aleaciones de metales y recuperar los más valiosos [7, 14].

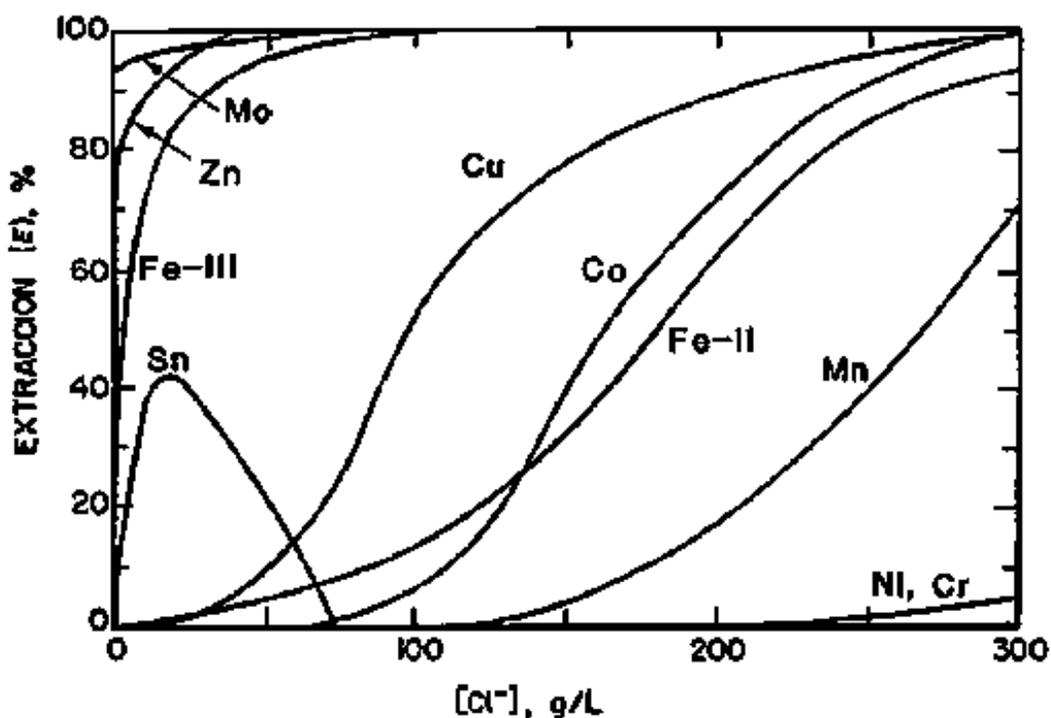


Fig.5 Porcentaje de extracción de varios metales en una solución a 40°C. La fase orgánica es 25% amina terciaria (Alamine 336), 15% dodecanol (Loral C12) y 60% keroseno (Nysolmin 75A). La fase acuosa es una solución de $CaCl_2$ a pH 2.

2.1.3 COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN

El uso práctico de la extracción por solventes para separar y purificar diferentes sustancias inclinó a Berthelot y a Jungfleisch a investigar la distribución de un gran número de componentes orgánicos e inorgánicos entre éter o disulfuro de carbono y el agua. En 1872 ellos introducen el término coeficiente de distribución (D), que describía como la distribución de un soluto dependía de su concentración en las fases orgánica y acuosa [7, 14].

Cerca de 20 años después, Nernst concluyó que era necesario tomar en cuenta las diferentes reacciones del soluto en cada fase, desde la dimerización en la fase orgánica como así, la disociación en la fase acuosa. Por ejemplo, en consecuencia la distribución del ácido benzoico (HBz) entre la fase orgánica (benceno) y el agua podía describirse como:

Fase orgánica: $2 \text{ HBz} = \text{H}_2\text{Bz}_2$

Fase acuosa: $\text{HBz} = \text{H}^+ + \text{Bz}^-$

La expresión matemática del coeficiente de distribución (D) es [12]:

$$D = [\text{HBz}]_{\text{org}} / [\text{HBz}]_{\text{aq}} \quad (3.3)$$

Donde, D es el coeficiente de distribución, $[\text{HBz}]_{\text{org}}$ es la cantidad del ácido benzoico en la fase orgánica y $[\text{HBz}]_{\text{aq}}$ es la cantidad de ácido benzoico en la fase acuosa.

El principal parámetro en extracción líquido-líquido es el coeficiente de distribución condicional o aparente, que toma en cuenta la concentración total del soluto (en cualquiera de sus especies) de la fase orgánica con respecto de la fase orgánica. En el ejemplo de Nernst, la concentración total del ácido benzoico en la fase acuosa es:

$$[\text{Bz}]_{\text{aq.tot}} = [\text{HBz}]_{\text{aq}} + [\text{Bz}^-]_{\text{aq}} \quad (e)$$

y su concentración en la fase orgánica:

$$[\text{Bz}]_{\text{org.tot}} = [\text{HBz}]_{\text{org}} + [\text{H}_2\text{Bz}_2]_{\text{org}} \quad (f)$$

Y por tanto, la expresión del coeficiente de distribución es:

$$D_{\text{Bz}} = \frac{[\text{Bz}]_{\text{org.tot}}}{[\text{Bz}]_{\text{aq.tot}}} = \left[\frac{[\text{HBz}]_{\text{org}} + [\text{H}_2\text{Bz}_2]_{\text{org}}}{[\text{HBz}]_{\text{aq}} + [\text{Bz}^-]_{\text{aq}}} \right] \quad (3.4)$$

Estas consideraciones fueron extendidas a complejos metálicos en 1902 por Morse, quien estudió la distribución de mercurio(II) entre tolueno y agua a diferentes concentraciones de los iones Hg^{2+} y Cl^- .

Para el Au (III) el coeficiente de distribución queda definido de la siguiente manera:

$$D_{\text{Au}} = \frac{[\text{Au}]_{\text{org}}}{[\text{Au}]_{\text{aq}}} = \left[\frac{[\text{Au}]_0 - [\text{Au}]_{\text{aq}}}{[\text{Au}]_{\text{aq}}} \right] \quad (3.5)$$

Donde:

D_{Au} = coeficiente de distribución del oro.

$[Au]_0$ = concentración del oro antes de la extracción.

$[Au]_{org}$ = concentración del oro en la fase orgánica.

$[Au]_{aq}$ = concentración del oro en la fase acuosa.

2.1.4 SELECTIVIDAD.

En la industria química la extracción liquido-liquido se ha usado en múltiples disciplinas, desde la extracción de sustancias químicas, medicamentos en las industrias farmacéuticas, en análisis químico de emisiones nocivas al ambiente, hasta la separación y extracción de metales en la hidrometalurgia. Esto quiere decir que este método de separación ha tenido un gran auge en los últimos años a tal grado que sigue siendo un tema muy concurrido en la investigación.

Uno de los más importantes parámetros o aspectos para decidir el tipo y sistema de extracción es la selectividad del extractante.

La selectividad del extractante se refiere a la afinidad o la tendencia que tiene la sustancia extractante hacia uno o varios solutos, los cuales se desean extraer o purificar.

En metalurgia es muy importante esto, ya que el utilizar uno u otro tipo de extractante cambia la dificultad de extraer un metal, en particular con respecto a una mezcla de metales o impurezas no deseadas.

Por ejemplo, cierto extractante puede tener de media a mucha afinidad por varios metales y no tener la capacidad de extraer algún otro. Esto depende mucho del tipo de extractante, ya sea extractante ácido, básico, quelante o solvatante, los cuales tienen una afinidad específica y diferente con respecto al tipo de metal que se tiene [7, 12].

La selectividad del extractante también depende del medio (comúnmente un medio de ácido clorhídrico) en el cual están los iones metálicos o complejos que se extraerán.

En la figura 6 se muestra la selectividad que tienen las aminas para la extracción de varios metales en un medio ácido. En este estudio se observa la selectividad de la amina hacia el Zn y Fe (III) en concentraciones bajas del ácido clorhídrico, pero a concentraciones más elevadas su selectividad disminuye con los otros metales.

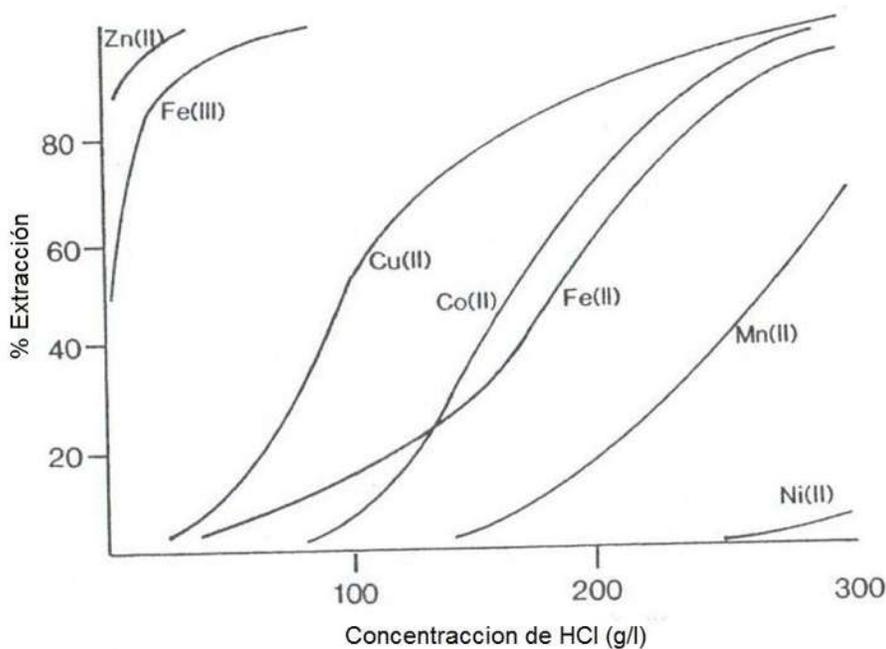


Fig 6 Extracción de clorocomplejos metálicos usando aminas.

2.2 ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS (Ultravioleta-Visible)

La espectrofotometría es el conjunto de técnicas que utilizan la luz para medir concentraciones químicas.

2.1.1 PROPIEDADES DE LA LUZ

Es conveniente describir la luz tanto en términos de partículas como de ondas. Las ondas de la luz constan de campos eléctricos y magnéticos que oscilan en planos perpendiculares entre sí.

La longitud de onda (λ), es la distancia entre las crestas de dos ondas. La frecuencia (ν), es el número de oscilaciones completas de una onda en un segundo. La unidad de frecuencia es el inverso de los segundos, s^{-1} . Una oscilación por segundo también se le llama hercio (Hz).

La relación de la frecuencia y la longitud de onda es:

$$\nu \lambda = c \quad (3.6)$$

Donde, c es la velocidad de la luz (2.998×10^8 m/s en el vacío). En un medio distinto del vacío, la velocidad de la luz es c/n , donde n es el índice de refracción de ese medio. Para longitudes de onda en el visible, la mayoría de las sustancias tienen $n > 1$, de modo que la luz se propaga más lentamente a través de la materia que en el vacío. Cuando la luz atraviesa dos medios con diferentes índices de refracción, la frecuencia permanece constante, pero varía la longitud de onda.

Desde el punto de vista de la energía, es más conveniente concebir a la luz como partículas llamadas fotones. Cada fotón transporta energía, E , dada por:

$$E = h \nu \quad (3.7)$$

Donde h es la constante de Planck ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ J. s)

Combinando las anteriores dos ecuaciones se puede escribir:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hc\tilde{\nu} \quad (3.8)$$

Donde $\tilde{\nu}$ es el número de onda. La energía es inversamente proporcional a la longitud de onda pero directamente al número de onda.

La luz roja, con una longitud mayor que la luz azul es menos energética que la luz azul. La unidad del sistema internacional del número de onda es el inverso del metro, m^{-1} .

En la figura 7 están marcadas las distintas regiones del espectro electromagnético. Los nombres de las regiones responden a razones históricas. La luz visible, que es la forma de radiación electromagnética que vemos, representa solo una pequeña fracción del espectro electromagnético [15].

Cuando una molécula absorbe un fotón aumenta la energía de la molécula. Se dice que la molécula ha pasado a un estado excitado. Si una molécula emite un fotón, disminuye la

energía de la molécula. El estado de mínima energía de una molécula se llama estado fundamental.

La figura 7, indica que la radiación de microondas estimula el movimiento rotacional de las moléculas cuando absorben esa radiación. La radiación IR estimula el movimiento vibracional de las moléculas cuando la absorben, y las radiaciones visible y ultravioleta hacen que pasen a orbitales de mayor energía. Los rayos X y la radiación UV de longitud de onda corta rompen enlaces químicos y ionizan a las moléculas [15].

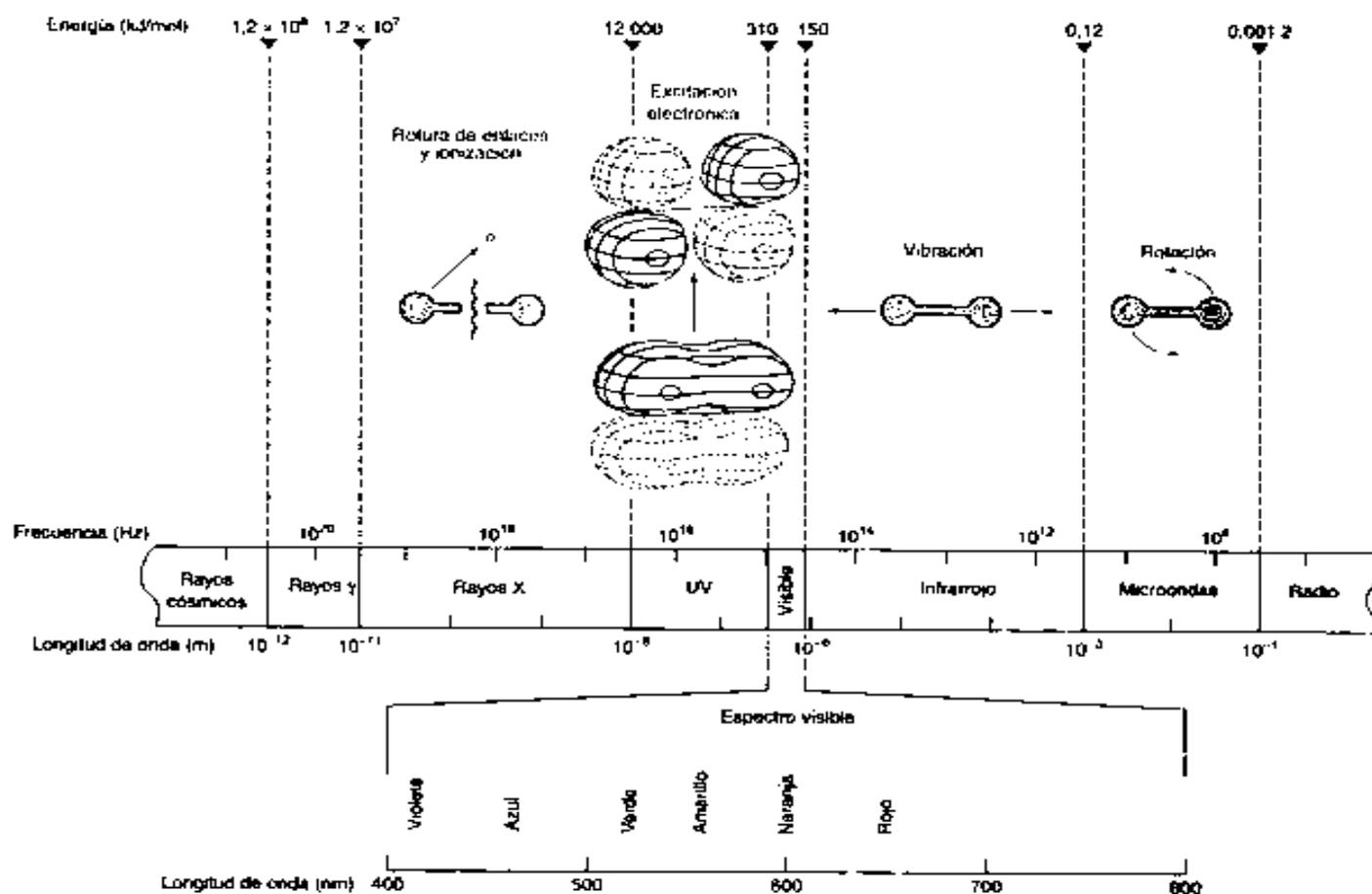


Fig. 7 Espectro electromagnético, donde aparecen los procesos moleculares representativos que ocurren cuando se absorbe luz en cada una de sus regiones. El espectro visible va desde una longitud de onda de 380 a 780 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

2.1.2 ABSORBANCIA

Cuando una muestra absorbe luz, la radiación del haz de luz disminuye. La irradiancia, P , es la energía por segundo y por unidad de área del haz de luz. La luz se hace pasar a través de un monocromador (prisma, red de difracción o incluso un filtro) para seleccionar una longitud de onda. La luz de una sola longitud de onda se llama monocromática, o sea, de un "color". La luz monocromática, con una irradiancia P_0 , incide en una muestra de longitud b . La intensidad de la radiación del haz que emerge por el otro lado opuesto de la muestra es P , como la muestra puede haber absorbido algo de luz, $P < P_0$.

La transmitancia (T), se define como la fracción de la luz incidente que pasa a través de la muestra:

$$\text{Transmitancia: } T = P / P_0 \quad (3.9)$$

Por tanto, T puede valer de 0 a 1. El porcentaje de transmitancia es simplemente $100 T$ y su valor es de 0 a 100%. La absorbancia (A) se define como:

$$\text{Absorbancia: } A = \log(P_0 / P) = -\log T \quad (3.10)$$

Cuando no se absorbe luz, $P = P_0$ y por lo tanto $A = 0$. Si se absorbe el 90 % de luz, se transmite el 10%, y $P = P_0/10$. Este cociente vale $A = 1$. Si solamente se transmite el 1% de la luz, $A=2$.

La densidad a veces se llama densidad óptica [15].

2.1.3 LEY DE BEER

La ley de Beer, expresa que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración (C), de la especie que absorbe la luz en la muestra:

$$\text{Ley de Beer: } A = \epsilon b c \quad (3.11)$$

La ecuación (3.11), que es el fundamento de la espectrofotometría tal como se aplica en química analítica se denomina ley de Lambert-Beer o simplemente Ley de Beer. La absorbancia es adimensional, pero algunos escriben "unidades de Absorbancia" después de la Absorbancia. La concentración de la muestra, C , normalmente viene dada en unidades de mol L^{-1} o (M). El campo óptico (b), normalmente se expresa en centímetros.

La cantidad ϵ (épsilon) se llama absorptividad molar (o coeficiente de extinción) y sus unidades son $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$, y así el producto ϵbc es adimensional [15]. La absorptividad molar es la característica de una sustancia que nos dice cuanta luz absorbe a una longitud de onda determinada.

La Ley de Beer se podría escribir:

$$A = \epsilon \lambda bc \quad (3.12)$$

Porque A y ϵ dependen de la longitud de onda de la luz. La cantidad ϵ es simplemente un coeficiente de proporcionalidad entre la absorbancia y el producto bc . Cuanto mayor es la absorptividad, mayor es la absorbancia [15].

2.1.4 ESPECTRO DE ABSORCIÓN

Un espectro de absorción es un gráfico que muestra cómo varía A al variar la longitud de onda.

La parte de una molécula responsable de la absorción de la luz se llama cromóforo. Toda sustancia que absorbe luz visible aparece coloreada cuando transmite o refleja la luz. La luz blanca contiene todos los colores del espectro visible. La sustancia absorbe ciertas longitudes de onda de la luz blanca, y nuestros ojos detectan las longitudes de onda que no se absorben. El color observado se llama el complementario del color absorbido. Por ejemplo, el azul de bromofenol tiene un máximo de absorción a 591 nm y aparece de color azul. En la figura 8 se muestran algunos espectros de absorción para tres sustancias [15].

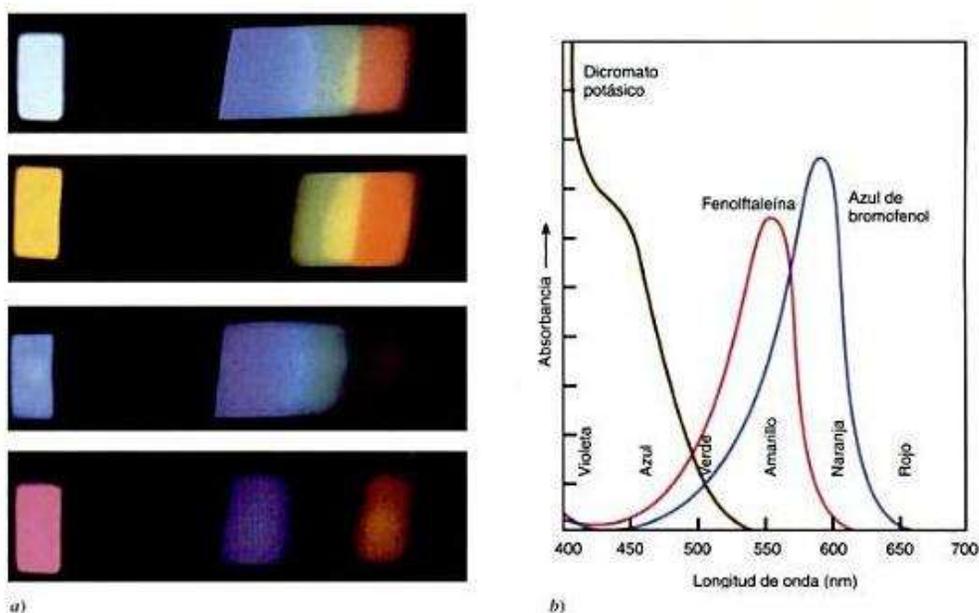


Fig. 8

LÁMINA EN COLOR Espectros de absorción
 a) Espectros visibles proyectados (de arriba abajo) de luz blanca, dicromato potásico, azul de bromofenol y fenolftaleína. b) Espectros de absorción visible de los mismos compuestos registrados con un espectrofotómetro.

2.1.5 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN UV-VIS (ULTRAVIOLTA-VISIBLE)

La luz procedente de una fuente continua pasa a través de un monocromador, que selecciona una banda estrecha de longitudes de onda del haz incidente. Esta luz “monocromática” atraviesa una muestra de camino óptico b , y mide la irradiancia de la luz que emerge.

En espectroscopia visible y ultravioleta se coloca una muestra líquida normalmente en una celda llamada cubeta, que tiene paredes lisas de sílice fundida (SiO_2). El vidrio es adecuado para espectroscopia visible, pero no para UV, porque absorbe radiación UV. Las cubetas más utilizadas tienen una longitud de camino óptico de 1 cm, y se venden en juegos calibrados para la muestra y la referencia [15].

CAPITULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 METODOLOGÍA

Se aplicó la extracción líquido-líquido para recuperar Au(III) de medios de ácido clorhídrico concentrado utilizando como extractante decanol disuelto en keroseno (diluyente orgánico). La eficiencia de extracción se determinó en función de la influencia de la concentración del ácido clorhídrico en el intervalo de $1 \text{ M} \leq [\text{HCl}] \leq 7 \text{ M}$ y del extractante ($0.2618 \text{ M} \leq [\text{decanol}] \leq 2.61 \text{ M}$) en keroseno.

El proceso de extracción se realizó en una etapa de extracción con una relación de fases igual a 1. Se colocaron volúmenes iguales de 5 mL de las soluciones acuosas y orgánicas en un embudo de separación y se agitó mecánicamente durante el tiempo necesario para alcanzar condiciones de equilibrio. Se separaron las fases en contacto y se cuantificó la concentración del metal en la fase acuosa mediante espectrofotometría UV-VIS. La fase acuosa contiene Au(III) 0.2 mM en medios de HCl y la fase orgánica contiene el decanol como extractante disuelto en keroseno. Se evaluó el coeficiente de distribución del metal entre las dos fases y a través de un análisis gráfico se caracterizó la especie extraída. Se determinó la selectividad del extractante para separar el oro del cobre, paladio y platino, estos metales frecuentemente se asocia al oro tanto en fuentes primarias como secundarias.

3.2 METODO CUANTITATIVO

La medición se realizó por duplicado teniendo un porcentaje de error menor al 5 %. La determinación de las concentraciones del metal se realizó mediante la técnica de espectrofotometría UV-VIS, usando un espectrofotómetro marca Perkin Elmer, modelo lambda 40 acoplado a una computadora.

El análisis se basa en la diferencia de la concentración del oro antes y después de la extracción, cumpliéndose el balance de masa del metal. Se utilizó una curva de calibración a diferentes concentraciones.

Nota: La curva de calibración para el oro se muestra en el apartado de anexos. Así como el espectro de absorción obtenido en el espectrofotómetro.

3.3 REACTIVOS Y EQUIPO

Los reactivos son grado analítico o superior.

- Solución estándar de Au con concentración de 1025 ppm en solución de HCl al 5%, Sigma- Aldrich.
- Solución estándar de Pd con concentración de 1005 ppm en solución de HCl al 5%, Sigma- Aldrich.
- Solución estándar de Pt con concentración de 979 ppm en solución de HCl al 5%, Sigma- Aldrich.
- Solución estándar de Cu con concentración de 1010 ppm en solución de HCl al 5%, Baker Co.
- Keroseno, Sigma- Aldrich.
- Decanol , Sigma- Aldrich.
- HCl, 37%. Sigma- Aldrich.

Equipo utilizado:

-Espectrofotómetro UV-VIS

Marca: Perkin Elmer Instruments.

Modelo: lambda 40 UV/VIS Spectrometer.

Utilizado para analizar el contenido del ion metálico en la solución acuosa.



-Agitador mecánico

Nombre: Wrist Action Shaker modelo: 75 Marca: Burrell

Utilizado para poner en contacto las fases y agitar.



-Balanza analítica

Marca: Sartorius Modelo: BP61S

Utilizada para pesar con exactitud y precisión las muestras y preparar las soluciones.



3.4 PROCEDIMIENTO.

3.4.1 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CONTACTO DE LAS FASES (TIEMPO DE AGITACIÓN).

Para nuestro análisis de los resultados es necesario llegar a un estado de equilibrio entre las fases, lo cual nos llevó a analizar el tiempo necesario y suficiente para alcanzar condiciones de equilibrio. El ensayo se realizó de la siguiente manera:

1. Primeramente preparamos la disolución de Au(III) de concentración 2×10^{-4} M en HCl 5 M, y la disolución de decanol 0.52 M en keroseno.
2. Se toman varias muestras (8) de volúmenes iguales de 5 mL de la fase acuosa (Au(III) en HCl) y de la fase orgánica (decanol-keroseno), y se mezclan en embudos de separación. También se tomó una muestra de la fase acuosa sin ser mezclada, ésta fue nuestra concentración inicial de Au(III).
3. Las muestras se colocan en el agitador mecánico y cada una se agita a diferente tiempo. Los tiempos de agitación fueron: 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 5 min, 10 min, 30 min y 60 min.
4. Se separaron las fases y se recuperó la fase acuosa.
5. Se determinó la concentración de Au(III) en la fase acuosa mediante espectrofotometría UV-VIS.
6. El tiempo de contacto entre las fases se determina graficando el % E vs tiempo de agitación.

Los resultados del ensayo se muestran en el capítulo IV.

3.4.2 EXTRACCIONES.

Después de determinar el tiempo de agitación para llegar al equilibrio, pasamos a realizar las diferentes extracciones.

Se estudia cómo influye en el porcentaje de extracción la variación de las concentraciones de extractante en la fase orgánica y la concentración del HCl en la fase acuosa.

1. Se preparan la fase acuosa de Au (III) 2×10^{-4} M en medios concentrados de HCl (1 M, 2 M, 3 M, 5 M y 7 M) y la fase orgánica con diferentes concentraciones de decanol en keroseno (0.2618 M, 0.5237 M, 0.7855 M, 1.0474 M y 2.61 M)
2. Se toman 5 mL de la fase acuosa y se mezclan con 5mL de la fase orgánica en un embudo de separación.
3. Las fases en contacto se agitan por 10 min, tiempo necesario para alcanzar el equilibrio. Se dejó reposar para evitar burbujas y emulsiones.
4. Se separan las fases acuosas y se mide la absorbancia en el espectrofotómetro UV-VIS para determinar la concentración de iones Au(III) utilizando la curva de calibración.

Este procedimiento se realizó por duplicado con un error de 5%. Los resultados se muestran en el apartado V.

3.4.3 PRUEBA DE SELECTIVIDAD DEL EXTRACTANTE.

Se realizó un análisis de la selectividad del decanol hacia el Au con respecto a otros metales importantes como el paladio, platino y cobre, que frecuentemente se asocian al oro en minerales y fuentes secundarias.

La concentración del metal en estudio fue de 2×10^{-4} M en dos diferentes medios de ácido clorhídrico. Se empleo un medio con relativamente una baja concentración de ácido (HCl 1 M) y uno de alta concentración (HCl 7 M). Respecto a la fase orgánica se utilizaron soluciones de decanol en keroseno con concentraciones 0.5237 M y 2.61 M. El tiempo de agitación fue de 10 min. La concentración del metal se determino por espectrofotometría UV-VIS. Al comparar el porcentaje de extracción de cada metal se establece la selectividad del extractante.

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 TIEMPO DE AGITACIÓN

La grafica 9, muestra la variación del porcentaje de extracción del oro en función de la variación del tiempo de agitación. En particular, el porcentaje de extracción del oro se define:

$$\%E = \frac{[Au]_{org}}{[Au]_0} * 100 = \left[\frac{[Au]_0 - [Au]_{aq}}{[Au]_0} \right] * 100$$

Donde:

$[Au]_0$ = concentración de oro inicial (antes de la extracción),

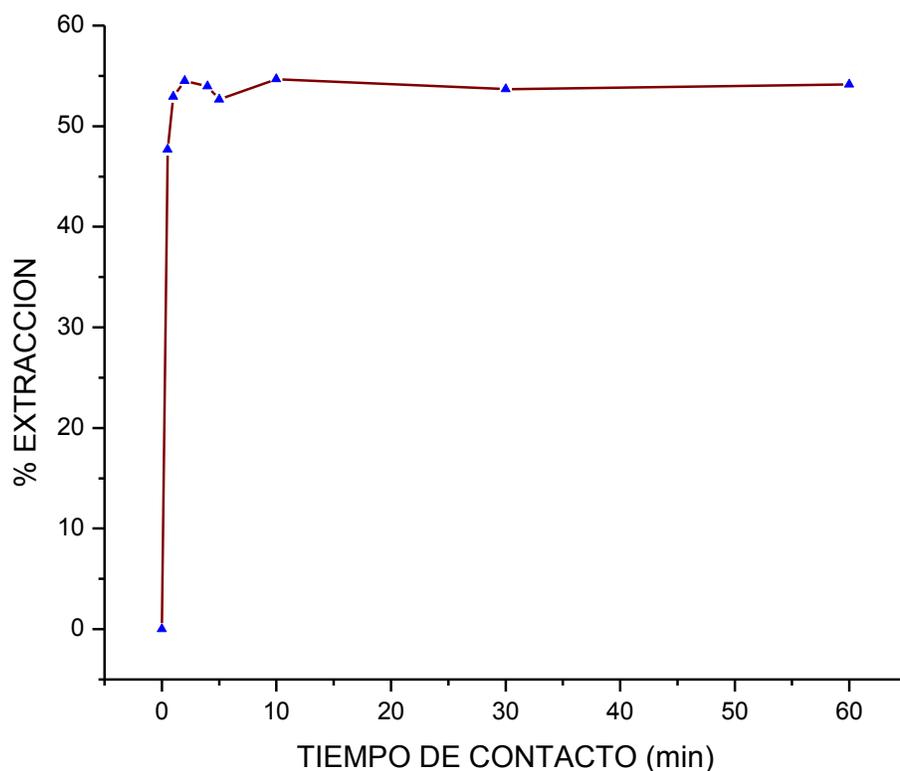
$[Au]_{org}$ = concentración de Au en la fase orgánica.

$[Au]_{aq}$ = concentración de Au en la fase acuosa.

El análisis del tiempo de contacto de la gráfica 9 nos sirve para determinar la cinética de la extracción y el tiempo de contacto hacia el equilibrio.

Observando el comportamiento que tienen las extracciones con respecto al tiempo, se demuestra que la cinética de la extracción es bastante rápida, requiriendo un tiempo de 5 min para establecer el equilibrio entre las fases.

Por consiguiente, se concluye que un tiempo de 10 min para la agitación será más que suficiente para que la separación llegue a equilibrio.



Grafica 9. Analisis del tiempo de contacto entre las fases para alcanzar el equilibrio.

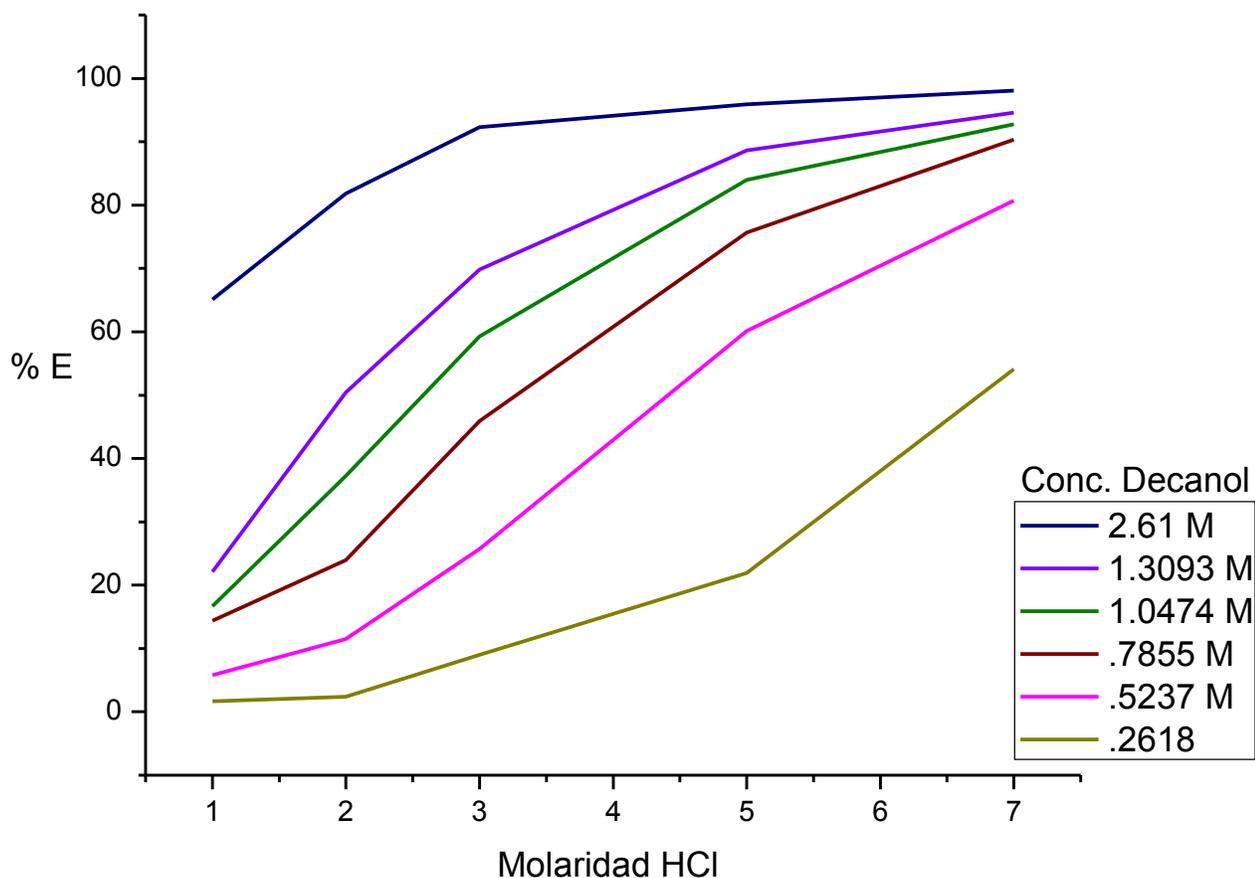
4.2 EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN

La influencia que tiene la concentración del medio ácido y del decanol en keroseno con respecto al porcentaje de extracción se analizó en la figura 10, en ella se grafica los valores de % de extracción vs concentración del medio ácido de HCl, para diferentes concentraciones de decanol-keroseno.

Analizando la grafica 10 se puede demostrar que si hay una influencia significativa de la concentración del medio ácido de HCl y la concentración del extractante con el porcentaje de extracción del oro en este sistema de extracción líquido-líquido. Se observa claramente que conforme se aumenta la concentración del medio ácido ($1M \leq [HCl] \leq 7 M$) el porcentaje de extracción se incrementa, así de igual manera influye el aumento de la

concentración del decanol (extractante) en la fase orgánica ($0.26 \text{ M} \leq [\text{decanol}] \leq 2.61 \text{ M}$), mientras más concentrado sea el extractante mayor es la extracción.

Grafica 10: Influencia de la concentración de HCl y decanol en el porcentaje de extracción.



El decanol es un extractante eficiente para separar Au(III), se tiene una recuperación del 98% del metal en medio de HCl 7 M empleando una concentración de decanol de 2.61 M en una sola etapa de extracción de 10 min.

4.3 COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN

El coeficiente de distribución nos muestra cómo se comporta nuestro soluto con respecto al equilibrio líquido –líquido y su distribución en las diferentes fases para diferentes condiciones de operación. El análisis de este parámetro nos da una idea clara de cómo variar las condiciones para mejorar el proceso de extracción del soluto deseado y optimizar el mismo al establecer las condiciones adecuadas del proceso.

El coeficiente de distribución se calcula con la ecuación:

$$D = \frac{[Au]_{org}}{[Au]_{aq}}$$

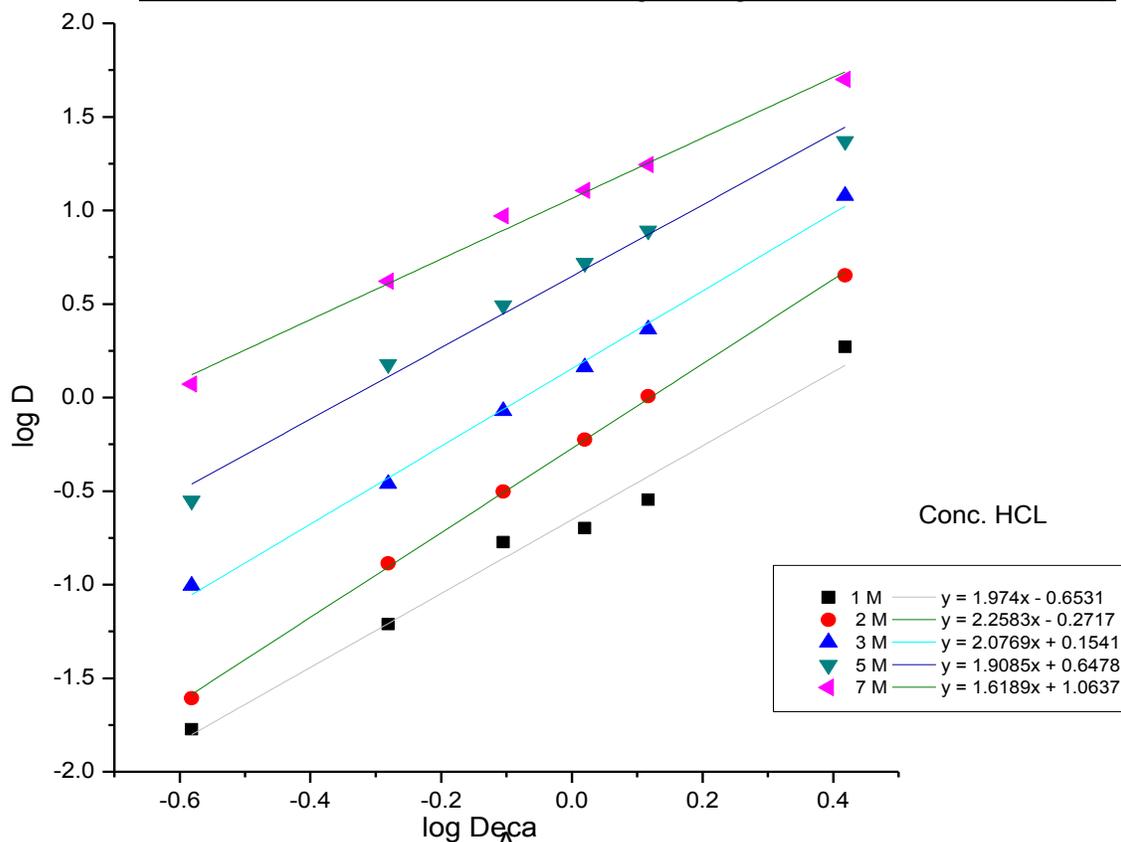
Donde:

D = coeficiente de distribución.

$[Au]_{org}$ = concentración de oro en la fase orgánica.

$[Au]_{aq}$ = concentración de oro en la fase acuosa.

Gráfica 11. Análisis del coeficiente de distribución. $\log D$ vs \log concentración de decanol (M).



La grafica 11, representa el log del coeficiente de distribución vs el log de la concentración de decanol. Las pendientes de las rectas representan la estequiometría respecto al decanol. Se observa que las pendientes tienden a un valor de 2. Además, el decanol es un extractante solvatante, por lo que el análisis gráfico nos permite asumir que la principal especie extraída es $\text{HAuCl}_4 \cdot 2\text{L}$, siendo L el decanol.

4.4 SELECTIVIDAD DEL EXTRACTANTE CON OTROS METALES.

La selectividad del extractante se refiere a la afinidad o la tendencia que tiene el extractante hacia uno o varios solutos que se desean extraer o purificar.

En metalurgia es muy importante esto, ya que el utilizar uno u otro tipo de extractante cambia la dificultad de extraer un metal, en particular con respecto a una mezcla de metales o impurezas no deseadas. Hemos estudiado como extrae el decanol al oro, ahora veremos su selectividad hacia otros metales comúnmente asociados al oro en fuentes primarias y secundarias, estos metales a estudiar fueron cobre, paladio y platino.

La concentración del metal en estudio se realizo por espectrofotometría UV-VIS. En el apartado de anexos se muestran los espectros de absorción y las curvas de calibración de cada metal.

4.4.1 Extracción del paladio.

A partir de una solución estándar de Pd de 1005 ppm en 5% de HCl se preparo la fase acuosa.

La extracción líquido-líquido se realizo teniendo como fase acuosa una solución de Pd(II) 0.2mM (21.28 ppm) en los medios concentrados de HCl 1 M y 7 M mientras que la fase orgánica contenía 2.61 M y 0.5237 M de decanol en keroseno. El tiempo de agitación fue de 10 min. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Ensayo de selectividad del paladio.

[HCl]	[Decanol]	Porcentaje de extracción %E
1 M	0.5237 M	0 %
	2.61 M	0.9 %
7 M	0.5237 M	1 %
	2.61 M	2.3 %

El análisis de la tabla 4, nos indica que la extracción del Pd con decanol en keroseno es menor al 3 % en las condiciones de estudio. Además, tomando en cuenta el margen de error de las mediciones, podemos afirmar que la extracción de paladio es muy pequeña. Se puede concluir que el decanol es selectivo para extraer oro del paladio en mezclas bajo las condiciones de estudio.

4.4.2 Extracción del platino.

Se prepararon soluciones de la fase acuosa de Pt en los medios de HCl 1 M y 7 M, con una concentración de 2×10^{-4} M (39.01 ppm). Se utilizó una solución estándar de Pt de 979 ppm en 5% de HCl. El ensayo de extracción líquido-líquido se realizó mezclando la fase acuosa con la fase orgánica que contenía 2.61 M y 0.5237 M de decanol en keroseno. El tiempo de contacto entre las fases fue de 10 min.

Los resultados de las extracciones se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Ensayo de selectividad del platino.

[HCl]	[Decanol]	Porcentaje de extracción %E
1 M	0.5237 M	0 %
	2.61 M	0.3 %

7 M	0.5237 M	0.5 %
	2.61 M	8.8 %

Los resultados del porcentaje de extracción mostrados en la tabla 5, indican que en los medios ácidos de HCl 1 M y 7 M y a bajas concentraciones de extractantes es posible separar selectivamente el oro del platino. En el caso de que la concentración de decanol aumente a 2.61 M y se emplee un medio de HCl 7 M, se observa que la extracción de platino aumenta un poco al extraerse el 8.8 %. Aún en estas condiciones, se puede considerar que el extractante es selectivo.

4.4.3 Extracción de cobre.

Los ensayos de extracción por solventes se realizaron con soluciones acuosas de Cu 0.2mM en los medios de HCl 1 M y 7 M y con una fase orgánica que contenía el decanol disuelto en keroseno en concentración 2.61 M y 0.5237 M. El tiempo de contacto entre las fases fue de 10 min.

Los resultados de las extracciones se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Ensayo de selectividad del cobre.

[HCl]	[Decanol]	Porcentaje de extracción %E
1 M	0.5237 M	7.4 %
	2.61 M	3.2 %
7 M	0.5237 M	0 %
	2.61 M	5.4 %

El análisis de la tabla 6, permite observar bajos valores del porcentaje de extracción de cobre, por lo que se puede concluir que el decanol no extrae cobre. El decanol es un extractante que separa selectivamente el oro del cobre.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. La cinética de la extracción es muy rápida, se llega a equilibrio entre fases en un tiempo de contacto menor a 10 min.
2. El porcentaje de extracción depende de la concentración del medio y del extractante. Observándose que a mayor concentración de HCl y de decanol, se incrementa el porcentaje de extracción de oro.
3. Las condiciones óptimas de extracción a temperatura ambiente, es una concentración de HCl 7 M y una concentración de decanol de 2.61 M en keroseno, alcanzando un 98% de recuperación de oro.
4. El extractante decanol es selectivo hacia el oro con respecto al paladio, platino y cobre.
5. El método de espectrofotometría de absorción Ultravioleta-Visible es un método analítico útil y preciso para la cuantificación de los metales en estudio.

El uso de decanol para la extracción de oro a nivel comercial en medio ácido de HCl, es muy apropiado por el alto porcentaje de extracción que se obtiene y la selectividad que éste tiene para recuperar al oro.

Finalmente se concluye que el sistema de extracción por solventes de Au(III) en medios concentrados de ácido clorhídrico con decanol disuelto en keroseno es eficiente y selectivo para separar oro del paladio, cobre y platino. El decanol en los medios de estudio extrae un 98% de oro. La especie extraída es el solvato $\text{HAuCl}_4 \cdot 2\text{L}$, siendo L la molécula de decanol.

REFERENCIAS

- [1] www.Gold.org, www.gold.org/about_gold/story_of_gold/,
www.gold.org/about_gold/story_of_gold/heritage/, www.gold.org/technology/,
www.gold.org/technology/why_gold/, www.gold.org/technology/uses/
- [2] http://herramientas.educa.madrid.org/tabla/4propiedades/4_79.html
- [3] <http://www.conciencia-animal.cl/paginas/temas/temas.php?d=1202>
- [4] Holleman, A.F. & Wiberg, Egon. *"Inorganic Chemistry"*, Academic Press, pp.1276-1290, (2001).
- [5] Housecraft, C.E. & Sharpe, A.G. *"Química Inorgánica"*, 2ª ed., Pearson Prentice Hall, (2006).
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Chloroauric_acid
- [7] Choppin, G.R, Cox, Michael, Musikas, C. & Rydberg, Jan. *"Solvent Extraction Principles and Practice"*, second edition, Marcel Dekker, pp 1-108 y 357-388, (1992).
- [8] http://es.wikipedia.org/wiki/Cianuraci%C3%B3n_del_oro
- [9] A.A. Baba, F.A.Adekola, D.O. Ojutemieden y F.D. Dada. *"Solvent Extraction of Gold from Hydrochloric Acid-Leached Nigerian Gold Ore by Tributylphosphate"*, Chemical Bulletin of politechnica university of Timisoara, Romania, vol 56(70),1,2011, pp 29-37
- [10] Feather A., Sole K. C., Bryson L. J. *"Gold refining by solvent extraction—the Minataur Process"* Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1997, July/August, p.169—173

[11] Ramírez Pelcastre, Juan Manuel. *“Recuperación de oro a partir de chatarra electrónica”*. Tesis licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, (2008).

[12] <http://www.ehu.es/ehusfera/materiales/files/2011/02/EXTRACCION-POR-SOLVENTE.pdf>

[13] <https://www.codelcoeduca.cl/proceso/lixiviacion/t-extraccion-solventes.html>

[14] Thornton, John D., *“Science And Practice of Liquid-Liquid Extraction”*, vol 2, (1992)

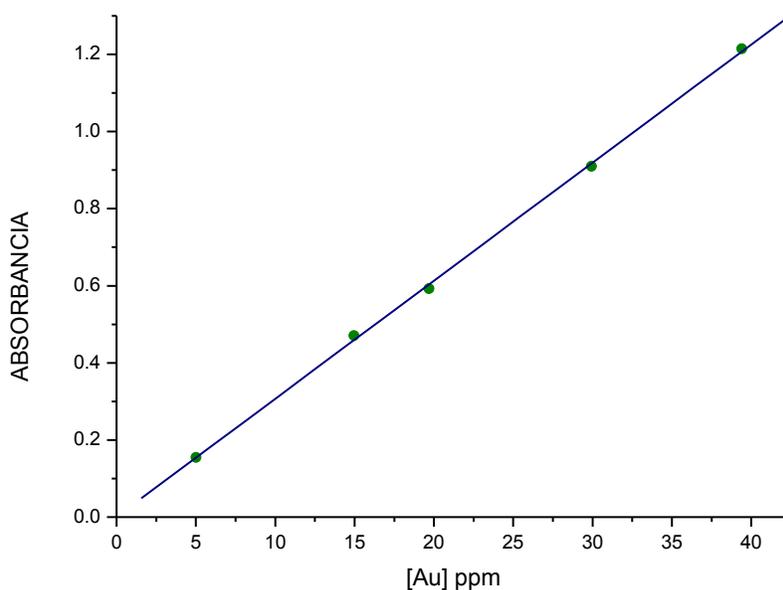
[15] Harris, Daniel C., *“Análisis químico cuantitativo”*, 3ra edición (sexta edición original), Editorial Reverté, pp 407-493, (2007).

[16] Morris D. F. C., Khan M. A. *“Application of solvent extraction to the refining of precious metals, Part 3: purification of gold”* Talanta, 1968. vol. 15, pp. 1301—1305.

APENDICE

A CURVAS DE CALIBRACION

A1.CURVA DE CALIBRACION DE Au



Elaboración de la curva de calibración

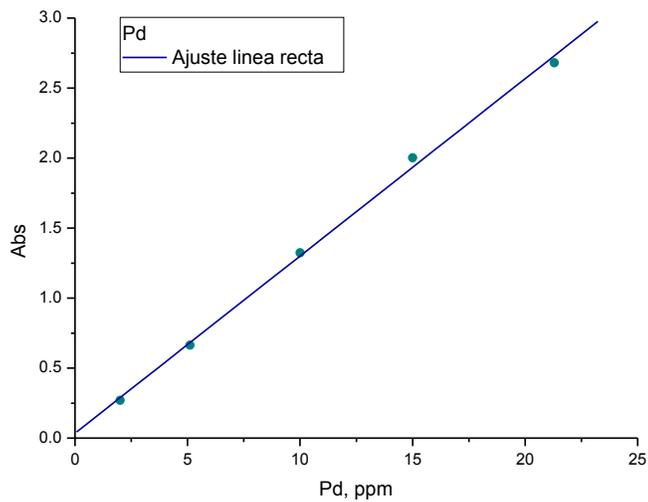
Se prepararon 5 soluciones estándar de Au(III) con 5, 15, 20, 30 y 40 ppm de concentración las cuales fueron analizadas por espectrofotometría UV-Vis. Primeramente se hizo un barrido de 800nm a 200 nm, a partir del cual se localizó la longitud de onda correspondiente a un máximo de absorbancia (313.8 nm). Así, posteriormente se realizan las mediciones a cada solución estándar a la longitud de onda de 313.8 nm.

La regresión lineal de los datos permite obtener la siguiente curva de calibración:

$$Abs = 0.0306[Au(III)] + 6.35 \times 10^{-4}$$

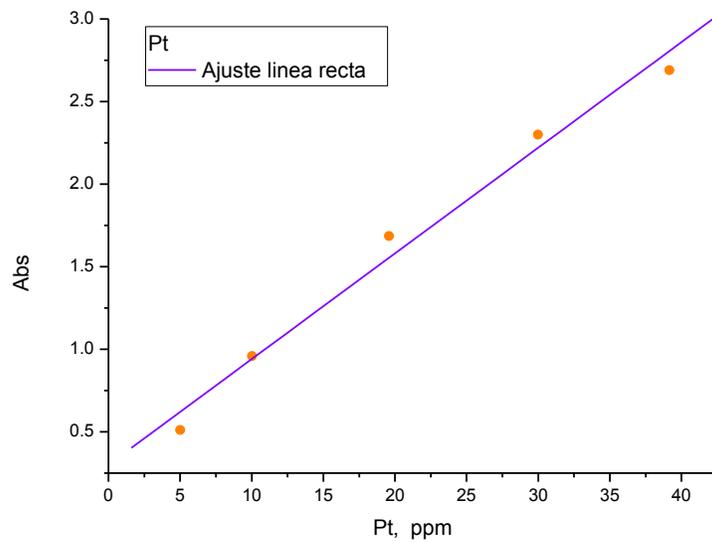
Con un coeficiente de correlación: $r = .999$

A2. CURVA DE CALIBRACION DE Pd



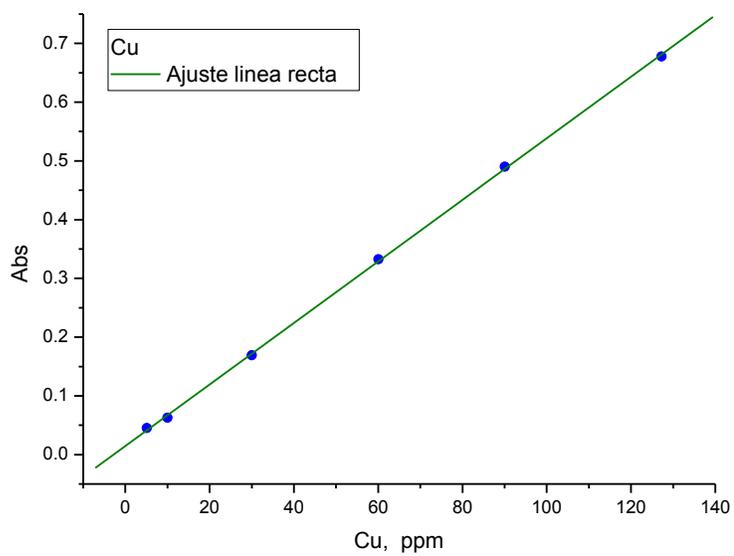
Curva de calibración: $Abs = 0.1266 [Pd(II)] + 0.0351$ $r = 0.9989$

A3. CURVA DE CALIBRACION DE Pt



Curva de calibración (II). $Abs = 0.06399 [Pt(II)] + 0.30$ $r = 0.9924$

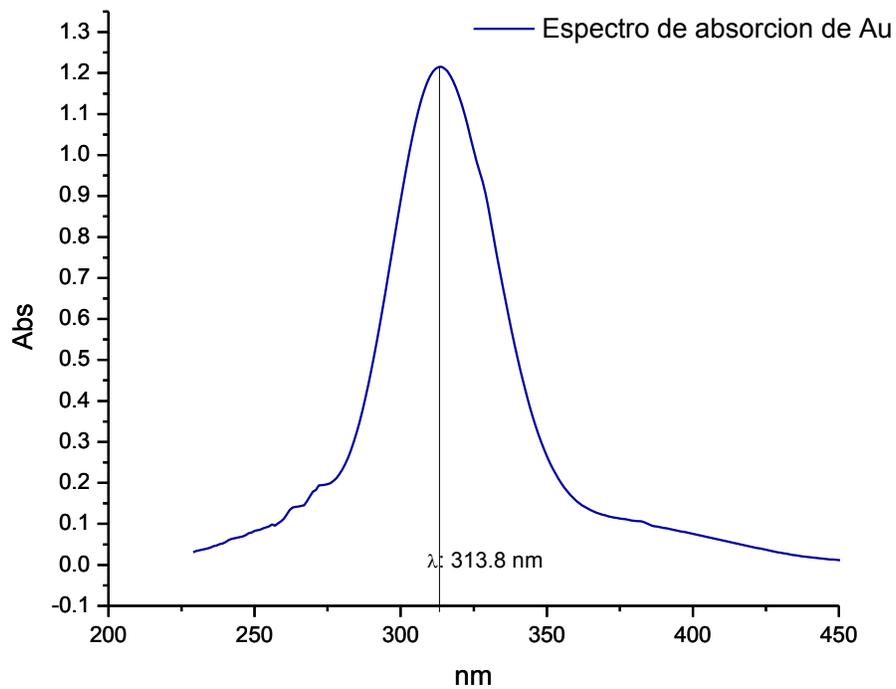
A4. CURVA DE CALIBRACION (Cu)



Curva de calibración: $Abs = 0.0052 [Cu(II)] + 0.0149$ $r = 0.9998$

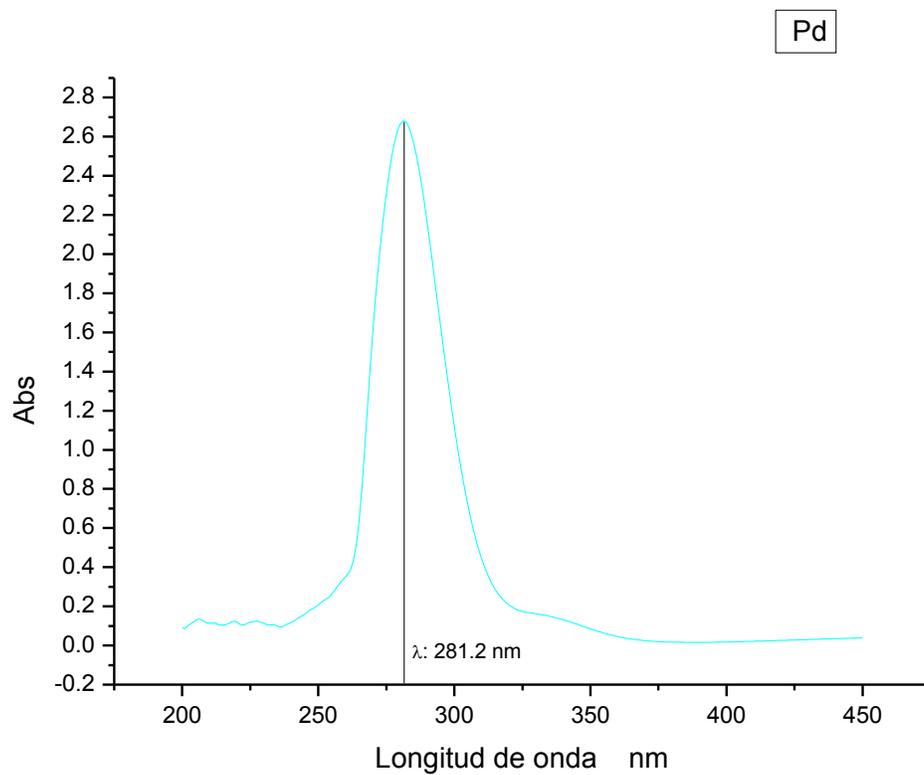
B ESPECTROS DE ABSORCIÓN

B1 Espectro de absorción de Au



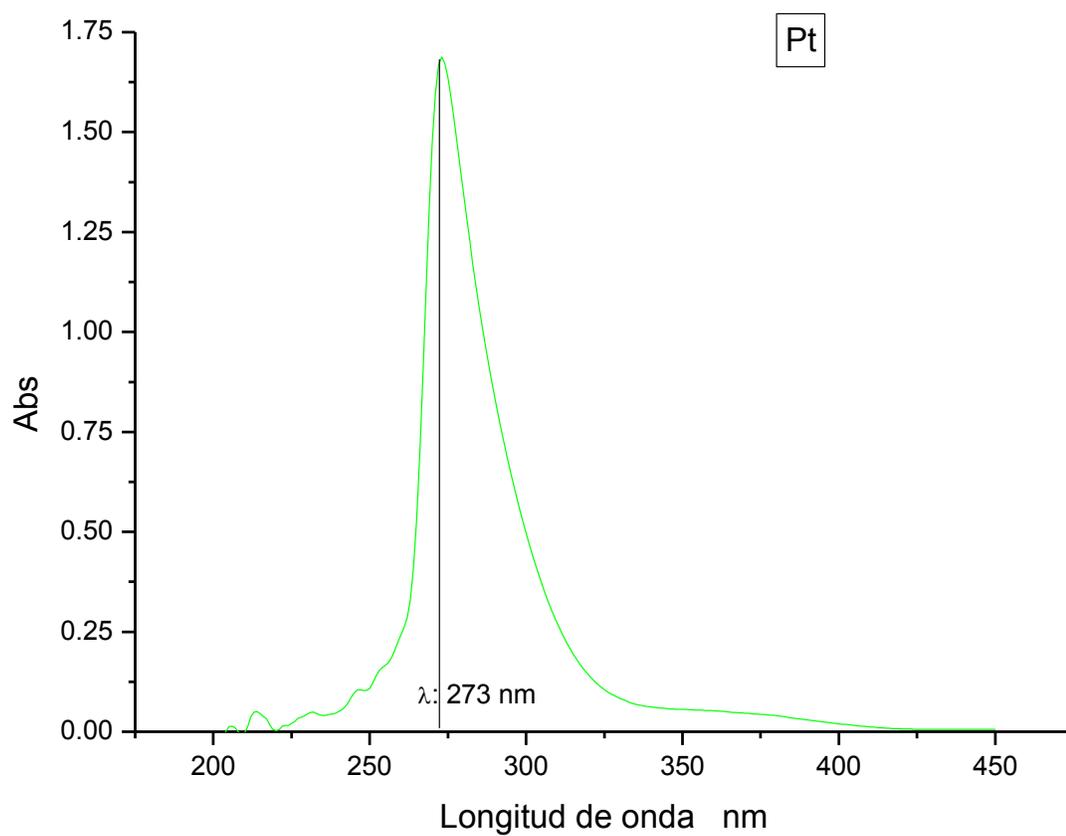
El espectro nos muestra la longitud de onda donde se alcanza un punto máximo de absorción a 313.8 nm en el cual se hacen las mediciones.

B2 Espectro de absorción de Pd



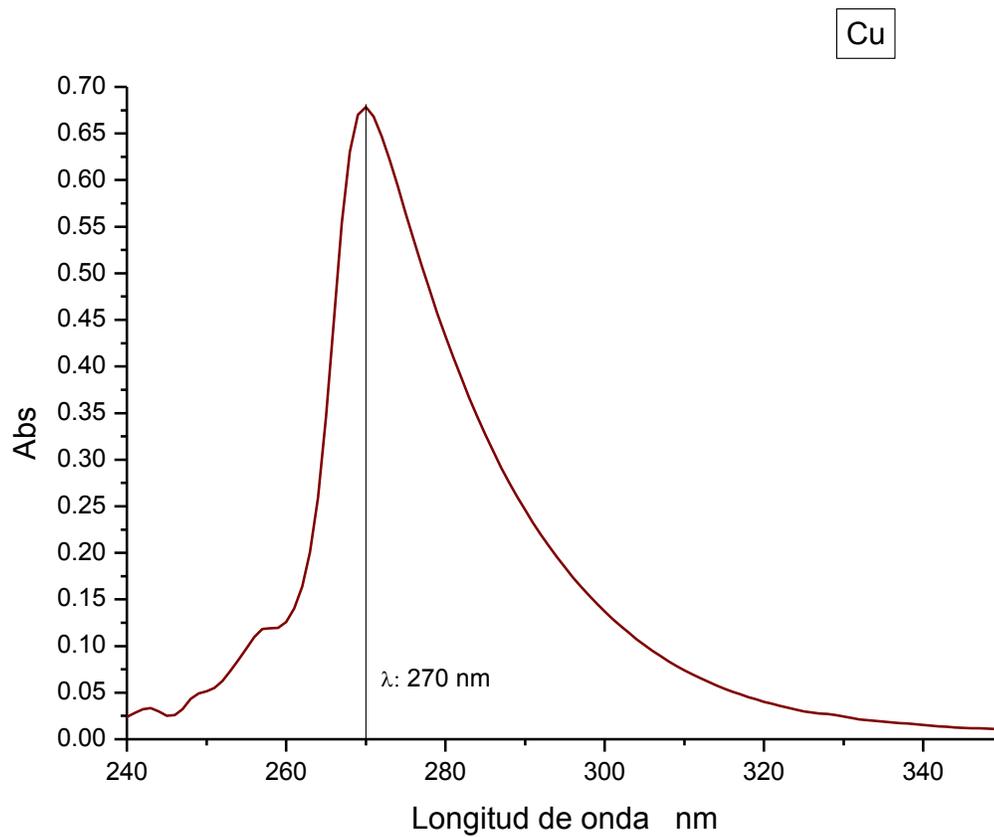
El espectro nos muestra la longitud de onda donde se alcanza un punto máximo de absorción que es de 281.2 nm en el cual se hacen las mediciones.

B3 Espectro de absorción de Pt



El espectro nos muestra la longitud de onda donde se alcanza un punto máximo de concentración que es de 273 nm en el cual se hacen las mediciones.

B4 Espectro de absorción de Cu



El espectro nos muestra la longitud de onda donde se alcanza un punto máximo de concentración que es de 270 nm en el cual se hacen las mediciones.