



# Separación de metales en soluciones acuosas mediante membranas poliméricas con extractantes novedosos

## *Separation of metals from aqueous solutions using polymeric membranes with novel extractants*

Alfonso Lemus-Solorio <sup>1</sup>, María Elena Núñez-Gaytán<sup>1</sup>, Ana María Núñez-Gaytán<sup>1</sup>, Martha Angélica Lemus-Solorio <sup>2</sup>, Sandra Núñez-Hernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Ciudad Universitaria; Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria, Edificio “E”, Planta Baja. Laboratorio de Investigación a Microescala. Morelia, Michoacán; México [1414433d@umich.mx](mailto:1414433d@umich.mx), [1209689x@umich.mx](mailto:1209689x@umich.mx), [amnunez@umich.mx](mailto:amnunez@umich.mx), [amnunez@umich.mx](mailto:amnunez@umich.mx), [9806299d@umich.mx](mailto:9806299d@umich.mx).

**Autor de correspondencia:** Alfonso Lemus Solorio, Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, [1209689x@umich.mx](mailto:1209689x@umich.mx) y clave ORCID: 0000-0003-2736-5600.

**Recibido:** 01 de Abril del 2021

**Aceptado:** 25 de Junio del 2021

**Publicado:** 30 de Junio del 2021

**Resumen.** - *El oro es un metal valioso. Hoy día, se tiene interés en la recuperación de este metal de fuentes primarias y secundarias (basura electrónica). Las técnicas de separación a base de membranas han incrementado su importancia ya que mediante la modificación de sus propiedades físicas y químicas dan como resultado su capacidad de separación de los analitos de interés. En este trabajo se estudió la eficiencia en la separación y recuperación de trazas de oro en HCl 5 M mediante un sistema de membranas poliméricas. Para ello, se sintetizaron membranas con diferente composición del soporte polimérico, plastificante y acarreador. El polímero utilizado fue el triacetato de celulosa y como acarreador y plastificante un fosfato orgánico (tris(2-etil-hexil) fosfato). Se utilizó una celda de dos compartimentos separados por la membrana polimérica y con una agitación de 500 rpm. El ciclo de operación del sistema fue de 180 minutos. La fase de alimentación contenía 0.2 mM de oro (III) en un medio concentrado de ácido clorhídrico 5 M y como fase de recuperación una solución salina. La membrana con mayor eficiencia presentó una composición del acarreador de 53.3% de tris(2-etil-hexil) fosfato. La concentración de oro se midió con un espectrofotómetro UV-Vis (modelo Lambda 40, marca Perkin-Elmer) a una longitud de onda de 313 nm. Se observó que la recuperación de oro es del 76% en un ciclo de operación. El acarreador demostró ser eficiente para la recuperación del metal en un medio concentrado de ácido clorhídrico 5 M.*

**Palabras clave:** Eficiencia de una membrana, permeabilidad, separación de metales preciosos, membranas poliméricas, acarreadores fosforados.



**Abstract.** - *Gold is a valuable metal. Nowadays, there is interest in the recovery of this metal from primary and secondary sources (electronic waste). Membrane-based separation techniques have become increasingly important because by modifying their physical and chemical properties they result in their ability to separate the analytes of interest. In this work, the efficiency in the separation and recovery of trace gold in 5 M HCl using a polymeric membrane system was studied. For this purpose, membranes with different composition of the polymeric support, plasticizer and carrier were synthesized. The polymer used was cellulose triacetate and as carrier and plasticizer an organic phosphate (tris(2-ethyl-hexyl) phosphate). A two-compartment cell separated by a polymeric membrane and with an agitation of 500 rpm was used. The operating cycle of the system was 180 min. The feed phase contained 0.2 mM gold (III) in a concentrated medium of 5 M hydrochloric acid and as recovery phase a saline solution. The membrane with the highest efficiency presented a carrier composition of 53.3% tris (2-ethyl-hexyl) phosphate. The gold concentration was measured with a UV-Vis spectrophotometer at a wavelength of 313 nm. Gold recovery was observed to be 76% in one cycle of operation. The carrier proved to be efficient for metal recovery in a concentrated 5 M hydrochloric acid medium.*

**Keywords:** Membrane efficiency, permeability, precious metal separation, polymeric membranes, phosphorus carriers.

## 1. Introducción

Existe una necesidad tecnológica en la industria química de encontrar nuevos métodos en procesos de separación, concentración y purificación de las sustancias presentes en una mezcla. En los últimos años la utilización de métodos de separación por medio de membranas está experimentando un elevado crecimiento motivado fundamentalmente por las severas restricciones a las que están siendo sometidos los procesos de extracción en base a disolventes.

La edad de oro de la tecnología de las membranas (1960-1980) comenzó en 1960 con la invención de Loeb y Sourirajan de la primera membrana asimétrica de ósmosis inversa (RO) de acetato de celulosa. Este desarrollo estimuló tanto el interés comercial como académico, primero en la desalinización por ósmosis inversa, y luego en otras aplicaciones y procesos. Durante este período, se lograron avances significativos en prácticamente todas las fases de la tecnología de las membranas: aplicaciones, herramientas de investigación, procesos de formación de membranas, estructuras y configuraciones químicas y físicas. La ósmosis inversa fue un

proceso establecido con plantas industriales instaladas en todo el mundo.

En el sentido más general, una membrana es una barrera selectiva que separa dos fases y restringe el transporte de varias especies químicas de una manera bastante específica. Hay membranas naturales (existentes en las células biológicas) y membranas sintéticas. Una membrana puede ser porosa o no porosa, simétrica o asimétrica en su estructura; Puede ser neutral, puede llevar cargas positivas o negativas. Su grosor puede variar entre menos de 100 nm a más de un centímetro. Los tamaños de poro pueden variar de 1 nm a 50  $\mu\text{m}$ .

En comparación con otros procesos de separación, la membrana es simple de instalar y requiere supervisión mínima [4]. Además, ocupa menos espacio y no tiene partes móviles; por lo que casi no necesita mantenimiento [5]. La propiedad clave que se explota es la capacidad de una membrana para controlar la velocidad de permeación de una especie química a través de la membrana. En cada tipo de membrana el mecanismo de separación es diferente, jugando en general un papel importante las interacciones

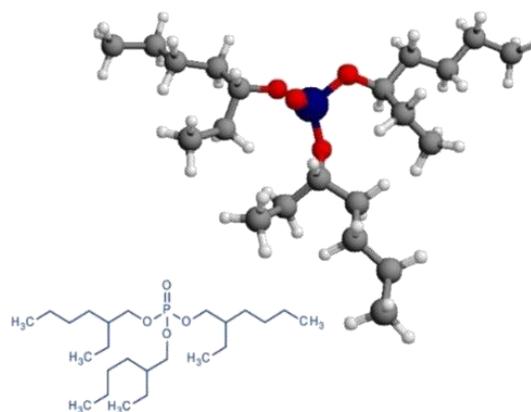


moleculares entre la membrana y los fluidos. En virtud de las diferencias en su grado de afinidad, la velocidad de transporte a través de la membrana será diferente para cada componente, siendo posible pues el transporte selectivo, o sea, la separación. Basado en el material, las membranas sintéticas se clasifican en inorgánicas y poliméricas [6].

En gran medida la recuperación y el reciclado resultan atractivos considerando el costo del proceso, en cuyo aprovechamiento se basa en que el valor de los productos recuperados exceda al valor del tratamiento. Esto ha llevado al uso irracional de sustancias químicas en la gran variedad de actividades que desarrolla la sociedad moderna. Un claro ejemplo es el uso irracional de las sustancias químicas en la extracción de oro, en donde se trabajan con grandes cantidades de solución de cianuro, una sustancia sumamente tóxica empleada para lavar el oro y que también acaba con la biosfera.

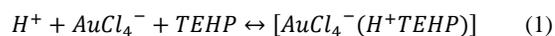
En el caso del oro por su enorme valor, su recuperación no representa un gran problema, siempre hay un mercado dispuesto a adquirirlo. Por ello es necesario incrementar las alternativas de mejoras e innovaciones en la recuperación de este metal precioso en efluentes hidrometalúrgicos ácidos.

Para estudiar las propiedades que presentan las membranas desde el punto de vista químico hay que considerar, la naturaleza química de la membrana y de las especies permeantes. En primer lugar, las especies permeantes deben penetrar en la membrana, a continuación, atravesar la membrana y finalmente salir de la misma. Aunque es lo que sucede en la segunda etapa lo que determinará fundamentalmente el transporte, para comprender totalmente el proceso, es necesario saber cómo las especies entran y abandonan la membrana. Este proceso de transporte es mediado por el acarreador (figura 1).



**Figura 1.** Molécula del agente de transporte tris (2-ethylhexil) fosfato

El ácido cloroaurico ( $\text{HAuCl}_4$ ) presente en la solución de la fase de alimentación da lugar a un ión complejo  $\text{AuCl}_4^-$  con afinidad hacia el acarreador TEHP luego se forma un complejo “acarreador + especie a separar” en la superficie de la membrana ecuación (1):



El complejo  $\text{AuCl}_4^-(\text{H}^+\text{TEHP})$  puede moverse en la superficie de la membrana y desplazarse al lado opuesto. En el lado de la fase de recuperación la especie  $\text{AuCl}_4^-$  es convertida en  $\text{AuCl}_3$  a bajas concentraciones del ion cloruro. La estabilidad efectiva de la mayoría de los complejos es función de la concentración del ligando y del pH de la solución ecuación (2):



Debido a que existe un gradiente de concentración, este acarreador acopla el flujo de dos especies. Debido a este acoplamiento, una de las especies puede moverse contra su gradiente de concentración, siempre que el gradiente de concentración de la segunda especie acoplada sea suficientemente grande, en este caso trasladará una cantidad neta de protones  $\text{H}^+$  de la fase de alimentación a la fase de recuperación.



La eficiencia de extracción de este acarreador se deriva principalmente de su grupo fosforil, el átomo de oxígeno es el responsable en la

## 2. Metodología

### 2.1 Preparación de membranas.

Una membrana polimérica de inclusión está compuesta por un polímero, un plastificante y un acarreador. El acarreador es esencialmente el responsable de transportar la especie de interés a través de la membrana. El soporte polimérico le proporciona a la membrana fuerza mecánica, mientras que el plastificante le provee elasticidad y flexibilidad [8].

Para efectuar la preparación de las membranas se procedió como sigue (figura 2):

1. Se disolvió el triacetato de celulosa (soporte polimérico) en diclorometano (diluyente orgánico volátil) a temperatura ambiente.
2. En el siguiente paso se añadieron el acarreador y plastificante [Tris(2-etil-hexil) fosfato] y la solución se agitó durante 30 minutos para obtener una solución homogénea.
3. Posteriormente la mezcla se colocó en un molde de vidrio circular.

coordinación del enlace formado con el metal ecuación (3):



4. El disolvente de esta solución mixta se dejó evaporar lentamente en el recipiente de vidrio circular durante 48 horas a temperatura ambiente. La membrana se forma después de la evaporación del disolvente orgánico y posteriormente se desprende la membrana del molde.

### 2.2 Estudio de transporte de oro (III) a través de la membrana.

Se utilizó una celda de dos compartimentos separados por la membrana polimérica. La fase de alimentación se preparó a partir de una solución de oro certificada de 1025 ppm en HCl al 5% (Aldrich). La fase de recuperación contenía una solución salina de NaCl 0.1 M.

Una vez terminado el paso anterior, inmediatamente se procede al armado del equipo, tomando precaución de que no haya fugas en las conexiones.

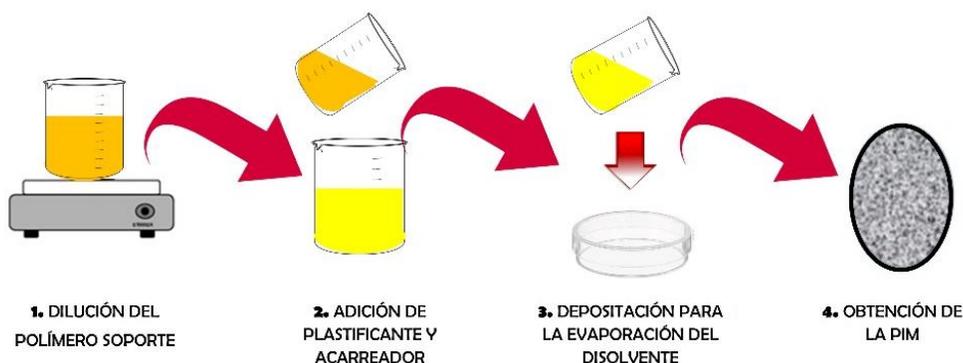


Figura 2. Esquema general para la elaboración de la membrana polimérica de inclusión (PIM).



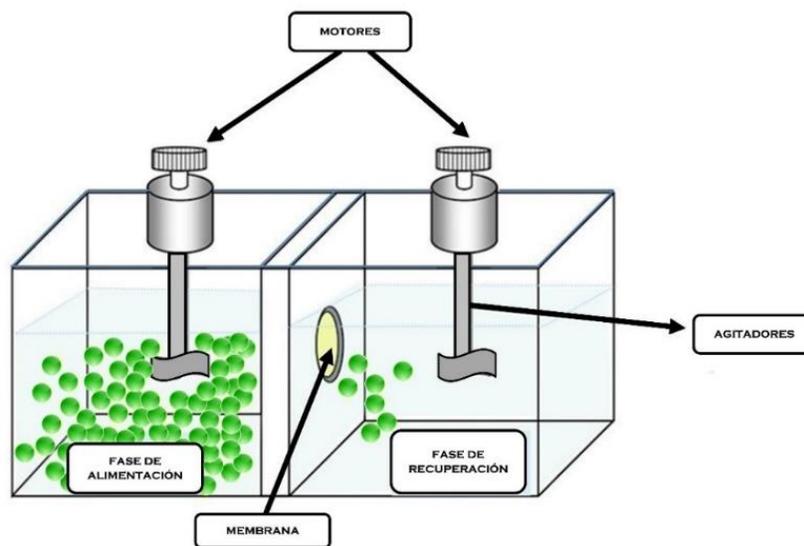
La descripción del aparato de separación, son dos compartimentos de forma cúbica con un orificio circular en uno de sus lados, en la que la película de la membrana se sujeta firmemente entre los dos compartimentos y que sirve como área de transporte en el proceso, también está provisto de dos motores con agitadores los cuales se introducen hasta que llegue casi al fondo de cada uno de los compartimentos. Ambas fases se agitan mediante los motores colocados en la parte superior a una velocidad de 500 rpm para asegurar que las fases tengan un mezclado uniforme. El ciclo de operación fue de 180 min. El aparato se muestra en la figura 3.

En la fase de alimentación se vierten 80 mL de la solución de oro (III) (Aldrich) 0.0002M y en la fase de recuperación se vierten 80 mL de NaCl 0.1 M.

El motor de agitación se conecta a una corriente eléctrica controlando la velocidad de agitación en ambas fases.

Las muestras de las fases de alimentación y recuperación se extrajeron periódicamente cada 30 minutos a través de un puerto de muestreo con una pipeta Pasteur y después se depositaron en frascos de 5 mL para posteriormente determinar las concentraciones de iones metálicos.

Para determinar la concentración de presente en ambos compartimentos se aplicó la técnica de espectrofotometría UV-Vis. La ley de Lambert-Beer estipula que la absorbancia de una solución es directamente proporcional de la concentración de la solución, por lo que la espectrofotometría UV-Vis puede usarse para determinar la concentración del oro en la solución. Se seleccionó una longitud de onda de 313 nm, para realizar las medidas que corresponde a un máximo de absorbancia del oro.



**Figura 3.** Sistema de membranas poliméricas de inclusión.

Al determinar la absorbancia de las distintas muestras, se utilizan cubetas espectrofotométricas con un paso óptico de 10,0 mm y un volumen máximo de 3,0 mL. Antes de efectuar las medidas

se ha de comprobar, de acuerdo con lo indicado en la parte teórica de este trabajo, que las cubetas estén perfectamente limpias y que las paredes transparentes estén secas. Es muy importante no



tomar siempre la cubeta por los lados traslúcidos, introducirla en el área de muestras de manera que los dos lados transparentes de la cubeta queden hacia los lados abiertos del soporte, y cerrar la puerta del área de muestras.

Para terminar con el ciclo de operación, basta con suprimir la agitación de las soluciones en ambas fases.

### 2.4 Eficiencia de la membrana.

Se sintetizaron 12 membranas poliméricas de inclusión con diferente composición del fosfato orgánico y del triacetato de celulosa. Las

## 3. Resultados y Discusiones

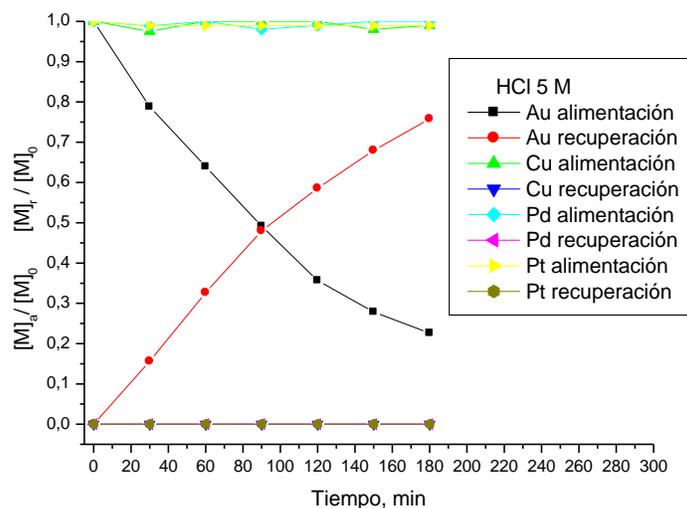
### 3.1 Selectividad del oro

Para estudiar la selectividad del acarreador TEHP, el sistema de membrana descrito anteriormente para el oro se aplica, sin embargo, en esta ocasión el estudio está centrado principalmente en la recuperación de los metales que son: platino, paladio y cobre, metales que

membranas se colocan en medio de una celda de permeación de dos compartimientos, separando las fases de alimentación y recuperación. Ambas fases se agitan mediante unos motores colocados en la parte superior a una velocidad de 500 rpm para asegurar que las fases tengan un mezclado uniforme. Se tomaron muestras a intervalos de 30 minutos de tiempo durante el transcurso del experimento para evaluar la separación del metal.

La eficiencia de cada membrana en la extracción de oro se evaluó con la determinación de la permeabilidad de la membrana y el porcentaje de oro obtenido en la fase de recuperación.

frecuentemente se asocian al oro en fuentes primarias y secundarias. En la figura 4.2 se puede observar las fracciones molares de los diferentes metales, incluyendo el oro como metal de estudio; tanto en la fase de alimentación como en la de recuperación.



**Figura 4.** Transporte de Au (III), Pd (II), Pt (II) y Cu (II) a través de la membrana óptima. Composición de membrana: 53.3% de TEHP; Alimentación: [Au (III)] = [Pd (II)] = [Pt (II)] = [Cu (II)] =  $2 \times 10^{-4}$  M; Recuperación: [NaCl] = 0.1 M



### 3.2 Permeación de Au (III) a través de las membranas.

La determinación de presente en ambos compartimentos se llevó a cabo mediante la técnica de espectrofotometría UV-Vis, esta técnica se basa en la aplicación de la ley de Beer-Lambert: “la cantidad de luz absorbida por una sustancia es función exponencial de su concentración y del paso óptico de la radiación”.

Esta técnica permite el seguimiento dinámico del flujo de oro (III) a través de la membrana

midiendo la absorbancia óptica; atendiendo a lo indicado en el párrafo anterior proporciona, por lo tanto, las concentraciones de Au (III) presentes en muestras extraídas periódicamente.

El flujo de iones a través de la membrana se determina mediante la siguiente ecuación:

$$J = \left(\frac{V_{fs}}{S_m}\right) \cdot \frac{dC}{dt} \quad (4)$$

También puede escribirse cómo:

$$J = PC \therefore P[Au^{3+}] = \left(\frac{V_f}{S_m}\right) \frac{dAu^{3+}}{dt} \quad (5)$$

Integrando la ecuación 4.5 y bajo la condición limitante de baja concentración de iones permeables, la relación entre  $\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$  y el tiempo es lineal (Danesi et al., 1982) y puede describirse por la ecuación:

$$\ln \frac{[Au^{3+}]_t}{[Au^{3+}]_0} = -P \frac{S_m}{V_f} t \quad (6)$$

$$\ln \left[1 - \frac{[Au^{3+}]_t}{[Au^{3+}]_0}\right] = -P \frac{S_m}{V_f} t \quad (7)$$

Las ecuaciones 6 y 7 pueden ser representadas por una línea recta:

$$y = mx + b \quad (8)$$

donde:

**Tabla 1.** Parámetros, simbología y unidades de medida.

Parámetros	Simbología	Unidades
Flujo del ion metálico	J	$\frac{cm \cdot M}{min}$
Volumen de la fase de alimentación (a), volumen de la fase de recuperación (r).	$V_{a,r}$	$cm^3$
Concentración de oro (III) a un tiempo (t).	$[Au^{3+}]_t$	M
Concentración de oro (III) inicial.	$[Au^{3+}]_0$	M
Área efectiva de la membrana	$S_m$	$cm^2$
Permeabilidad.	P	$\frac{cm}{min}$
Concentración de la especie en estudio.	C	M
Concentración de la fase de alimentación (a), Concentración de la fase de recuperación (r).	$C_{f,r}$	M
Concentración inicial (0), concentración a un tiempo (t).	$C_{0,t}$	M

Será suficiente conocer el valor de la pendiente en esta recta y conociendo todas las constantes de la ecuación (6); se puede calcular la permeabilidad (P) en la fase de alimentación y con la ecuación (7) se calcula la permeabilidad en la fase de recuperación.

Con la finalidad de estudiar el transporte de oro (III) influenciado por los componentes de la membrana, se determinó el transporte de oro para membranas poliméricas de inclusión (PIM) a diferente composición de triacetato de celulosa (polímero) y del fosfato orgánico (plastificante y acarreador) en una celda de permeación. La fase de alimentación contenía trazas de Au (III) en el nivel de  $2 \times 10^{-4}$  M en ácido clorhídrico 5 M (Aldrich). La solución de recuperación fue de 0.1 M en medio cloruro. Se demostró que el medio cloruro es eficiente en la recuperación del oro.

Fue posible determinar la composición óptima de los componentes en la membrana. La membrana óptima es la que presenta un mayor transporte del

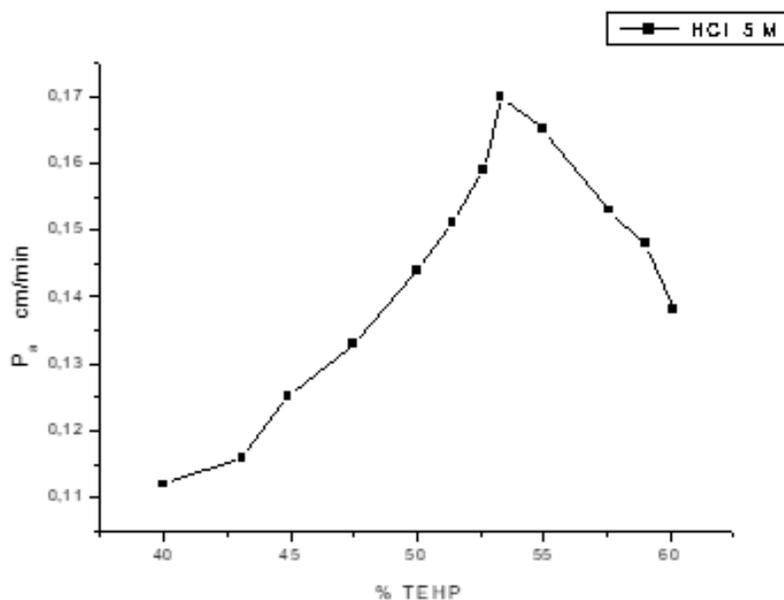


oro lo que corresponde al valor de permeabilidad más elevado. En la tabla 2, se observa que la membrana de composición 46.7% de triacetato de celulosa y un 53.3% de tris (2- etilhexil) fosfato es la más eficiente. La figura 5, es la representación gráfica de la tabla 2. La

membrana óptima separó un 76% del metal en un ciclo de operación de 180 minutos. La concentración se expresa en fracción molar del metal en cada fase,  $a/C_0$  para la fase de alimentación y  $r/C_0$  para la fase de recuperación.

**Tabla 2.** Eficiencia de las membranas. Valores de permeabilidad  $P_F$  para diferentes composiciones de membranas. TAC: triacetato de celulosa. TEHP: tris(2-etil-hexil) fosfato.

Membrana	%TAC	%TEHP	$P_F$ cm/min
M1	60	40	0.112
M2	56.9	43.1	0.116
M3	55.1	44.9	0.125
M4	52.5	47.5	0.133
M5	50	50	0.144
M6	48.6	51.4	0.151
M7	47.4	52.6	0.159
<b>M8</b>	<b>46.7</b>	<b>53.3</b>	<b>0.17</b>
M9	45	55	0.165
M10	42.4	57.6	0.153
M11	41	59	0.148
M12	39.9	60.1	0.138



**Figura 5.** Variación de permeabilidad con respecto a la concentración del tris (2-etilhexil) fosfato para el transporte de oro a través de la membrana.



**Tabla 3.** Transporte de Au (III) a través de la membrana optima. Alimentación:  $2 \times 10^{-4}$  M de Au (III) en HCl 5 M. Recuperación: NaCl 0.1 M. Ciclo de operación: 180 min

Tiempo (min)	[Au (III)], ppm Alimentación	[Au (III)], ppm Recuperación	$[Au]_a / Au_0$ Fracción molar Alimentación	$[Au]_r / Au_0$ Fracción molar Recuperación
0	39.4	0	1	0
30	31.05	6.15	0.788	0.1561
60	25.20	12.871	0.6396	0.3267
90	19.371	18.915	0.4916	0.48
120	14.056	23.075	0.3567	0.5857
150	10.974	26.775	0.2785	0.6796
180	8.91	29.862	0.2261	0.758

En la gráfica de la figura 5, puede verse una curva de dispersión donde se aprecia claramente que la permeabilidad del oro depende de la composición de la membrana, se puede observar cómo, efectivamente, existe una composición óptima en el cual se presenta un valor alto de permeabilidad. Por lo que se deduce que la velocidad propia de la permeación, depende de las propiedades químicas (entre las que destaca la difusión facilitada).

### 3.3 Estudio de transporte selectivo.

Se debe enfatizar que, aunque en este estudio se demuestra que las membranas y el acarreador son permeables al oro, es conocido que el mecanismo selectivo de transporte varía de una membrana a otra, dependiendo de factores tales como la naturaleza química de la membrana y de las especies permeantes. Teniendo en cuenta este

hecho será, pues, necesario examinar el funcionamiento de la membrana para separar especies metálicas que frecuentemente se asocian al oro.

Para estudiar la selectividad de este acarreador, el sistema de membrana descrito anteriormente para el oro se aplica, pero esta vez el estudio está centrado principalmente en la recuperación de los metales que son: platino, paladio y cobre, metales que frecuentemente se asocian al oro en fuentes primarias y secundarias.

El cambio del estado de oxidación de algún elemento facilita a menudo los procedimientos de separación. [9] La estabilidad (y la solubilidad) de los complejos metálicos varía también con el estado de oxidación del ion metálico, habiéndose aprovechado este hecho para la separación de mezclas de iones metálicos.

**Tabla 4.** Concentración inicial de los diferentes metales en molaridad (M) y en partes por millón (ppm).

Metal	Concentración inicial en la fase de alimentación (M)	Concentración inicial en la fase de alimentación (ppm)
Platino	$2 \times 10^{-4}$ M	39.02 ppm
Paladio	$2 \times 10^{-4}$ M	21.28 ppm
Cobre	$2 \times 10^{-4}$ M	12.71 ppm
Oro	$2 \times 10^{-4}$ M	39.40 ppm



**Tabla 5.** Especies estudiadas y características de oxidación.

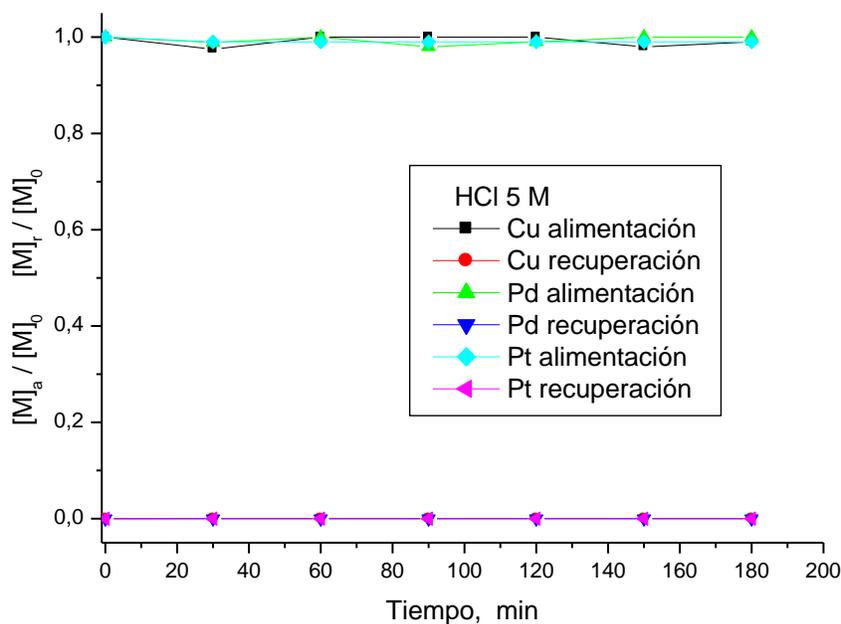
Metal	No. de oxidación	Especie
Au	III	$\text{AuCl}_4^-$
Pt	II	$\text{PtCl}_4^{2-}$
Pd	II	$\text{PdCl}_4^{2-}$
Cu	II	$\text{CuCl}_4^{2-}$

El oro se oxida a +I y +III, en ambos casos es un metal “clase b” o “soft” y por tanto coordina preferentemente con ligandos clasificados como bases blandas. La estructura y la carga del complejo formado varía considerablemente de un metal a otro, así como su estabilidad, y depende del estado de oxidación del metal. En la tabla 3, se presentan las especies estudiadas.

Para estudiar la selectividad del acarreador en la separación/recuperación de los diversos metales, el análisis se llevó a cabo utilizando membranas de composición 46.7% de triacetato de celulosa y un 53.3% de tris(2-etilhexil) fosfato. En la fase de alimentación se utilizó una solución de concentración  $2 \times 10^{-4} \text{M}$  para cada metal en un

medio de HCl 5M. En la fase de recuperación se empleó una solución de NaCl 0.1M. En la tabla 4 se indican las concentraciones iniciales de los metales estudiados.

A partir de los resultados anteriores se puede afirmar que la selectividad del extractante TEHP con respecto al oro es excelente. El Cu, Pd y Pt no se transportan a través de la membrana en un ciclo de operación de 180 min, a comparación del oro. Por tanto, la membrana óptima es selectiva para separar el Au (III) del Cu, Pd y Pt en las condiciones del proceso de separación por membranas poliméricas, como podemos verlo gráficamente en la figura 6.



**Figura 6.** Transporte de Pd (II), Pt (II) y Cu (II) a través de la membrana óptima; Composición de membrana: 53.3% de TEHP; Alimentación:  $[\text{Pd(II)}]=[\text{Pt(II)}]=[\text{Cu(II)}]= 2 \times 10^{-4} \text{M}$ ; Recuperación:  $[\text{NaCl}]= 0.1 \text{M}$ .

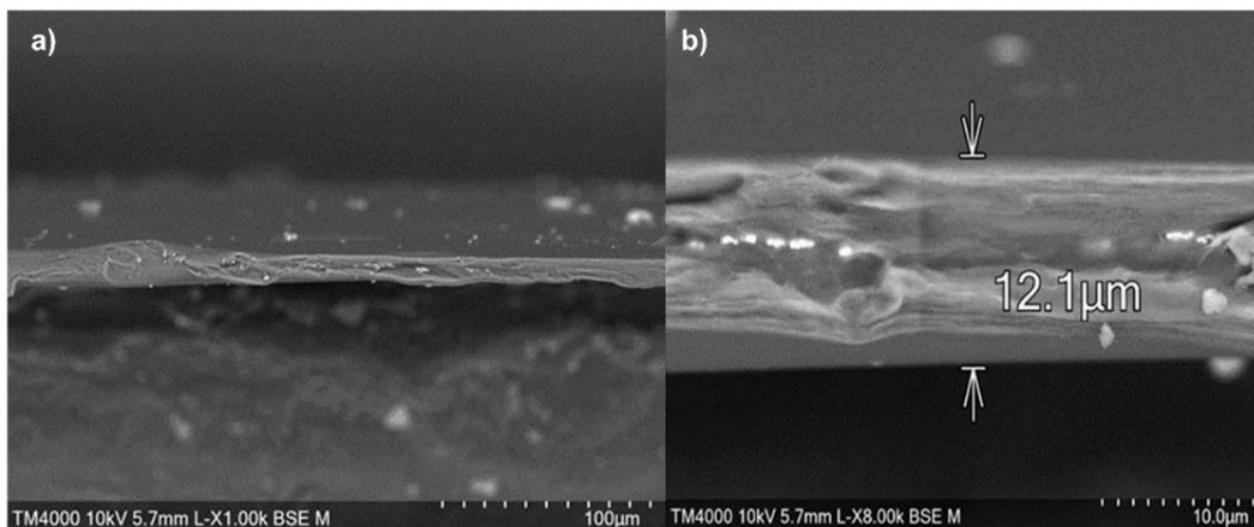


### 3.7 Morfología de la membrana.

La membrana se caracterizó por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Se analizó la membrana optima. El análisis de las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (Microscopio electrónico de barrido HITACHI TM4000Plus) se muestra en la figura 7a. Se observa la morfología de la membrana en su interior y sobre la superficie. Se muestra la presencia de partículas irregulares de oro en el interior y sobre la superficie de la membrana (a y b). Se determinó el espesor de la membrana polimérica de inclusión. La figura 7b muestra que su espesor es de aproximadamente 12.1  $\mu\text{m}$ .

### 3.8 Espesor de la membrana.

Evidentemente, tratándose de un problema de difusión, cuanto mayor sea el camino a recorrer (espesor de la membrana), menor será la velocidad de transporte. Sin embargo, al reducir demasiado el espesor tiene un problema mecánico debido a que la película es muy delgada y se rompen (figura 8). Una forma de resolver este problema es optimizando la cantidad de triacetato de celulosa y del acarreador.



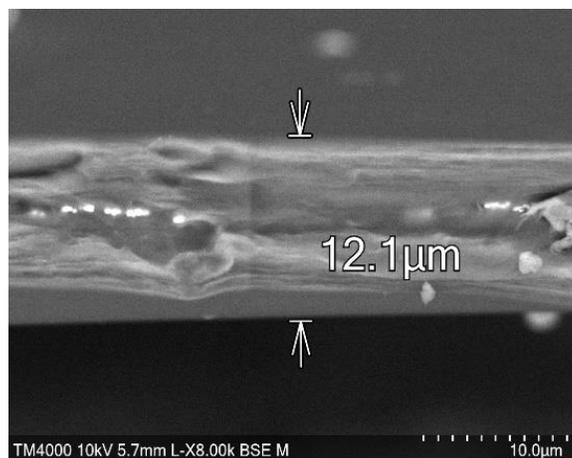
**Figura 7.** Microscopía electrónica de barrido de la MPI utilizada en medio de HCl 5 M. (a) Imagen del interior y superficie de la membrana. b) . Espesor de la membrana polimérica de inclusión que contiene el acarreador y plastificante tris(2-etilhexil) fosfato.



### 3. Conclusiones

El tris(2-etilhexil) fosfato (TEHP) funciona como acarreador y plastificante; siendo

eficiente para la recuperación de trazas de oro en medios concentrados de ácido clorhídrico (Aldrich) mediante la separación con membranas poliméricas de inclusión.



**Figura 8.** Espesor de la membrana polimérica de inclusión que contiene el acarreador y plastificante tris(2-etilhexil) fosfato. Microscopio HITACHI TM4000Plus

En el estudio de la selectividad con relación a otros metales como cobre (II), paladio (II) y platino (II), los resultados obtenidos muestran que ninguno de los metales mencionados es extraído en estas condiciones experimentales. Respecto a la extracción del oro (III) por parte del acarreador, se demostró que la separación es notable y se consigue en un periodo relativamente corto, por lo que se deduce que el TEHP es un agente de extracción selectivo para el oro (III)

La concentración óptima del polímero, acarreador y plastificante en la membrana favorece la separación eficiente del oro. El acarreador es sustancial para el transporte del metal, sin embargo, una cantidad excesiva de acarreador puede dar como resultado la acumulación del oro en la membrana. Asimismo, una cantidad excesiva de plastificante puede conducir a una pérdida de éste de la membrana debido a las condiciones hidrodinámicas del sistema; mientras que una cantidad insuficiente de plastificante puede conducir a

permeabilidades muy bajas. Se recuperó un 76% del oro en un tiempo relativamente corto que corresponde a un ciclo de operación de 180 min. Por tanto, la membrana polimérica de inclusión más eficiente contiene una composición óptima de 46.7 % (p/p) de triacetato de celulosa (polímero, TAC) y 53.3 % (p/p) de acarreador y plastificante (TEHP). La permeabilidad de la membrana es de 0.17 cm/min.

### 5. Reconocimiento de autoría

**Alfonso Lemus-Solorio:** Investigación; Escritura borrador original; Metodología; Análisis formal. **María Elena Núñez-Gaytán:** Investigación; Metodología; Supervisión; Adquisición de fondos. **Ana María Núñez-Gaytán:** Conceptualización; Metodología; Recursos. **Martha Angélica Lemus-Solorio:** Análisis formal; Curación de datos; Metodología; Investigación. **Sandra Núñez-Hernández:** Conceptualización; Validación; Análisis formal.



## Referencias

- [1] M. Mulder, Basic Principles of Membrane Technology, Kulwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992 pp1-26.
- [2] W. Pusch and A. Walch, Synthetic Membranes-Preparation, Structure, and Application, Angew. Chem. Int. Ed. Engl., 21 (1982) 660.  
<https://doi.org/10.1002/anie.198206601>
- [3] Richard M. Baker, Membrane Technology and Applications, John Wiley & Sons, Ltd., England, 2004, pp6.
- [4] A. Ismail, K. Khulbe, and T. Matsuura, Gas Separation Membranes: Polymeric and Inorganic, Springer, 2015.
- [5] M. Stewart and K. Arnold, Gas Sweetening and Processing Field Manual, Gulf Professional Publishing, 2011.
- [6] A. Basile and F. Gallucci, Membranes for membrane Reactors: Preparation, Optimization and Selection, John Wiley & Sons, 2011.  
<https://doi.org/10.1002/9780470977569>.
- [7] Paulson, D., Membranes, the Finest Filtration, by Introduction to Crossflow Membrane Technology. Filtration News, 1995.
- [8] M. Sugiura, and H. Hirata, “Effect of Phospholipids on Carrier-Mediated Transport of Lanthanide Ions through Cellulose Triacetate Membranes”, Separ Sci Technol. 28. 1933-1937. 1993.  
<https://doi.org/10.1080/01496399308029252>.
- [9] W. F. Pickering, Química analítica moderna, editorial reverté s. a., 1980.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)