



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISION DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA
Y METALURGIA

EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA

ADSORCION DE PLATA EN CARBON ACTIVADO
A PARTIR DE SOLUCIONES DE BROMURO DE PLATA

Por

Ramona Guadalupe Martínez Meza

TESIS

presentada para obtener

Grado de Maestro
en
Metalurgia Extractiva

Hermosillo, Sonora.

Febrero, de 1996

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



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

INDICE DE CONTENIDO

	página
INDICE DE FIGURAS	i
INDICE DE TABLAS	iii
RESUMEN	v
I INTRODUCCION	1
II ANTECEDENTES	
2.1 Generalidades Sobre la Utilización del Bromo como Agente Lixivante	6
2.2 Generalidades del Carbón Activado	10
2.3 Aplicación de Carbón Activado en la Recuperación de Metales Preciosos.	21
2.3.1. Sistema cianuro	22
2.3.2. Sistema tiourea	24
2.3.3. Sistema cloruro	25
2.3.4. Sistema bromuro	26
III METODOLOGIA	
3.1 Material y Equipo	32
3.1.1. Solución de lixiviación.	32
3.1.2. Reactivos utilizados en las pruebas de adsorción de plata con carbón activado	33
3.1.3. Equipo utilizado en la adsorción con carbón activado ...	34
3.1.4. Equipo utilizado en el análisis	34
3.2 Pruebas de Recuperación	35

3.3	Análisis Químico	36
3.4.	Variables a Estudiar	36
IV	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION	
4.1	Capacidad de Adsorción	40
4.2	Química de la Solución	42
4.3	Efecto de la Velocidad de Agitación	45
4.4	Efecto de la Cantidad de Carbón Activado	47
4.5	Efecto de la Concentración de la Plata	49
4.6	Efecto de la Concentración de los Iones Cúprico	51
4.7	Efecto de la Temperatura	55
4.8	Efecto de la Concentración de los Iones Bromuro	58
V	CONCLUSIONES	60
VI	BIBLIOGRAFIA	62
VII	INVESTIGACION FUTURA	67
	APENDICES	69

INDICE DE FIGURAS

	página
Figura 1. Diagrama esquemático del equipo experimental	38
Figura 2. Isoterma de Langmuir Linelizada.	41
Figura 3. Diagrama de distribución de especies bromo-plata	43
Figura 4. Diagrama de distribución de especies bromo-cúprico	44
Figura 5. Efecto de la velocidad de agitación en la adsorción de plata	46
Figura 6. Efecto de la cantidad de carbón activado en la adsorción de plata	47
Figura 7. Efecto de la concentración de plata en la adsorción	48
Figura 8. Efecto de la concentración de iones cúprico en la adsorción de plata	52

Figura 9.	Efecto de la concentración de bromuro cúprico con respecto a la temperatura	53
Figura 10.	Efecto de la temperatura a alta concentración de bromuro cúprico	54
Figura 11.	Efecto de la temperatura en la adsorción de plata.	57
Figura 12.	Efecto de la concentración de iones bromuro en la adsorción de plata	59

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla I.	Datos experimentales de la Figura 2. Isoterma de Langmuir linealizada 70
Tabla II.	Datos de la Figura 3. Diagrama de distribución de especies del sistema bromo-plata 71
Tabla III.	Datos la Figura 4. Diagrama de distribución de especies del sistema bromo-cúprico 72
Tabla IV.	Datos experimentales de la Figura 5. Efecto de la velocidad de agitación 73
Tabla V.	Datos experimentales de la Figura 6. Efecto de la cantidad de carbón activado en la adsorción de plata 74
Tabla VI.	Datos experimentales de la Figura 7. Efecto de la concentración de plata en la adsorción de plata 75
Tabla VII.	Datos experimentales de la Figura 8. Efecto de la concentración de iones cúprico en la adsorción de plata 76

Tabla VIII.	Datos experimentales de la Figura 9.	
	Efecto de la concentración de iones cúprico a	
	bajas concentraciones de bromuro cúprico	777
Tabla IX.	Datos experimentales de la Figura 10.	
	Efecto de la temperatura en la adsorción de plata.	778
Tabla X.	Datos experimentales de la Figura 11.	
	Efecto de la concentración de iones cúprico en la	
	adsorción de plata	779
Tabla XI.	Datos experimentales de la Figura 12.	
	Efecto de la concentración de iones bromuro en la	
	adsorción de plata.	800

Resumen

Desde su implementación a través de muchas décadas, la cianuración ha sido el tratamiento predominante para la extracción de minerales y concentrados de metales preciosos, y ha probado ser muy efectiva y económica. Sin embargo las desventajas asociadas al proceso, como por ejemplo la alta toxicidad, fomentan la investigación y desarrollo de sistemas alternativos para la extracción de estos metales.

La utilización de los haluros en solución acuosa para la lixiviación y recuperación de metales preciosos ha sido motivo de estudio en los últimos años. Entre las ventajas más atractivas para su uso, están el moderado potencial de oxidación y la eliminación de otros agentes lixiviantes contaminantes para la recuperación de oro y plata.

El bromo y sus compuestos han mostrado ser buenos agentes lixiviantes, sin embargo no se han desarrollado ampliamente las técnicas de recuperación de los complejos bromo-metales preciosos.

Entre los métodos propuestos para la recuperación de metales preciosos a partir de soluciones acuosas de haluros se tienen: carbón activado, resinas de intercambio iónico, cementación con zinc, cementación con polvos de aluminio y

extracción por solventes.

El principal interés de esta investigación es la recuperación de plata a partir de soluciones de bromuro de plata, utilizando carbón activado como medio adsorbente estudiándose para esto las variables implicadas en el proceso.

En la realización de este trabajo, se utilizaron soluciones de lixiviación de plata grado reactivo 99.99% de pureza, medio de lixiviación consistente de bromuro cúprico y bromuro de sodio, utilizándose para esto el proceso de carbón en pulpa, los parámetros que se evaluaron fueron los siguientes: velocidad de agitación, cantidad de carbón activado, temperatura, concentración de plata, concentración de bromuro de sodio y concentración de bromuro cúprico.

Se pudo apreciar que la adsorción de plata en carbón activado, no presenta cambios significativos en el rango de velocidades estudiadas, 400 a 1000 rpm, manteniéndose la velocidad constante a 600 rpm en el resto de las pruebas experimentales, para efecto de la adsorción se observó que no se requiere de una alta velocidad de agitación, pero si la necesaria para mantener las partículas en suspensión, minimizando su asentamiento en el fondo del reactor.

Los resultados obtenidos indicaron que la velocidad de adsorción de los complejos bromo-plata aumenta al incrementarse la temperatura de 30 a 50 °C.

extracción por solventes.

El principal interés de esta investigación es la recuperación de plata a partir de soluciones de bromuro de plata, utilizando carbón activado como medio adsorbente estudiándose para esto las variables implicadas en el proceso.

En la realización de este trabajo, se utilizaron soluciones de lixiviación de plata grado reactivo 99.99% de pureza, medio de lixiviación consistente de bromuro cúprico y bromuro de sodio, utilizándose para esto el proceso de carbón en pulpa, los parámetros que se evaluaron fueron los siguientes: velocidad de agitación, cantidad de carbón activado, temperatura, concentración de plata, concentración de bromuro de sodio y concentración de bromuro cúprico.

Se pudo apreciar que la adsorción de plata en carbón activado, no presenta cambios significativos en el rango de velocidades estudiadas, 400 a 1000 rpm, manteniéndose la velocidad constante a 600 rpm en el resto de las pruebas experimentales, para efecto de la adsorción se observó que no se requiere de una alta velocidad de agitación, pero si la necesaria para mantener las partículas en suspensión, minimizando su asentamiento en el fondo del reactor.

Los resultados obtenidos indicaron que la velocidad de adsorción de los complejos bromo-plata aumenta al incrementarse la temperatura de 30 a 50 °C.

Para temperaturas mayores de 50 °C pudo apreciarse que no existe un cambio significativo en la adsorción.

Se observó que la recuperación de plata se incrementa con el aumento de la cantidad de carbón, esto es debido a que al incrementar la cantidad de carbón, se incrementa proporcionalmente el área superficial de contacto, aumentando con ello la disponibilidad de los sitios de adsorción.

Los resultados mostraron que para altas concentraciones, 80 y 100 ppm, la adsorción presenta un comportamiento lineal, hasta valores de 60 ppm, la velocidad de adsorción es alta, pero no se tiene una recuperación total de los valores, posiblemente debido a la competencia entre los bromo-plata y el bromo libre.

También se observó, que a medida que disminuye la concentración de plata en solución, la velocidad de adsorción aumenta, debido a que existe una mayor disposición de área superficial en el carbón activado.

Se observó que existe un descenso en la adsorción, cuando se incrementan los iones bromuro en solución, indicando que la capacidad de carga se inhibe, debido a la concentración excesiva de iones bromuro en solución.

I. INTRODUCCION

Desde su implementación, la cianuración ha sido el tratamiento predominante para la extracción de minerales y concentrados de metales preciosos. Sin embargo las desventajas asociadas al proceso, como la alta toxicidad, fomentan la investigación y desarrollo de sistemas alternativos para la extracción de estos metales.

La utilización de los haluros en solución acuosa para la lixiviación y recuperación de metales preciosos ha sido motivo de estudio en los últimos años. Entre las ventajas más atractivas para su uso, están el moderado potencial de oxidación requerido y la eliminación de otros agentes lixiviantes contaminantes para la recuperación de oro y plata.

El bromo y sus compuestos, han mostrado ser buenos agentes lixiviantes. Sin embargo, no se han desarrollado ampliamente las técnicas de recuperación de los complejos bromo-metales preciosos.

Entre los métodos propuestos, para la recuperación de metales preciosos a partir de soluciones acuosas de haluros se tienen: carbón activado, resinas de intercambio iónico, cementación con zinc, cementación con polvos de aluminio y extracción por solventes^[1].

El principal interés de esta investigación, es la recuperación de los valores de plata a partir de soluciones de bromuro de plata y en especial, el estudio de la adsorción del complejo plata-bromo en carbón activado, analizándose para ello las variables implicadas en este proceso.

II. ANTECEDENTES

Desde su invención, a fines del siglo XIX, la cianuración ha permanecido como el método estándar para el beneficio de oro y plata, debido a la simplicidad del proceso, además de que cuenta con dos importantes ventajas:

- * El cianuro es un complejo no oxidante
- * Se requiere de soluciones con un pH alto lo cual evita que se disuelvan en exceso otros elementos que se encuentran en el mineral.

Sin embargo también cuenta con dos importantes desventajas:

- * Es altamente tóxico al medio ambiente
- * Su cinética de reacción es lenta.

Bajo estas consideraciones, existe la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas más seguras, para la recuperación de los metales preciosos.

Tomando en cuenta lo anterior, se han desarrollado y propuesto lixiviantes alternativos, entre los que se puede mencionar a los haluros y dentro de ellos a los compuestos de bromo que presentan menores desventajas que la cianuración.

2.1 Generalidades Sobre la Utilización del Bromo Como Agente Lixivante de los Metales Preciosos.

El uso del bromuro en sistemas de lixiviación de metales preciosos a partir de minerales, fue reportado por Shaeffer en 1882. También Putnam en 1942, evaluó el efecto de disolución de metales preciosos en varias soluciones de bromo^[2,3].

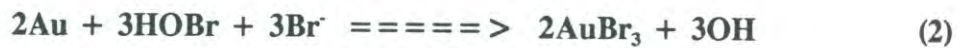
En los últimos años, se han analizado varios sistemas de bromo: La compañía Great Lakes en 1987 patentó un proceso, en el cual se utiliza un compuesto de dibromo-dimetil-hidantoin para la lixiviación de varios minerales^[4,5].

En contacto con el agua el dibromo-dimetil-hidantoin (DBDMH), Geobrom 5500, se hidroliza para desprender bromo libre:



El dimetil-hidantoin (DMH) ha demostrado ser un agente que compleja los iones, manteniéndolos en solución. El ácido hipobromoso (Geobrom 3144, dimetil-hidantoin), es también un poderoso agente oxidante que disuelve al oro^[4,5].

La oxidación de los metales por el bromo es directa: como lo muestra la reacción (2), donde se requieren tres moles de ácido hipobromoso, para oxidar dos moles de oro a tribromuro de oro, el cual se compleja con el ion de bromuro adicional para formar el tetrabromuro de oro, tal como lo muestra la reacción (3). Se utiliza bromuro de sodio sólido (Geobrom 099) o líquido (Geobrom 046) para proveer los iones adicionales de bromuro.



Yanez ^[6], realizó estudios de lixiviación de oro con soluciones de bromuro cúprico y bromuro de sodio, utilizando la técnica de disco rotatorio, donde los parámetros analizados fueron: temperatura, concentración de bromuro cúprico, concentración del ion bromuro y velocidad de agitación. Los resultados experimentales mostraron que las soluciones con contenido de bromuro cúprico y bromuro de sodio son apropiadas para disolver oro^[6].

Debido a la influencia de la temperatura, existen dos mecanismos controlantes. Para temperaturas mayores de 60 °C, el proceso se encuentra bajo control electroquímico. Para temperaturas

menores de 60 °C, aparentemente existe un control por reacción química.

También se encontró que la temperatura, la concentración de bromuro cúprico y la concentración de iones bromuro tienen un gran efecto sobre la velocidad de disolución, ya que al aumentar el rango de estos parámetros aumenta la disolución de oro en solución^[6].

También, se han realizado estudios sobre el sistema bromato bromuro en la recuperación de oro y han reportado excelentes resultados. Sin embargo el sistema de la plata es mucho más complejo, ya que presenta restricciones importantes de solubilidad^[7].

El ion bromato (BrO_3^-) tiene la ventaja de un potencial de oxidación-reducción ligeramente bajo (+ 1.44 mV), por lo que puede oxidar seis moles de plata por mol, mientras que el H_2O_2 oxida 2 moles de plata por mol, de acuerdo a las siguientes reacciones:



En medio ácido, la velocidad de disolución de la plata es rápida y se incrementa a medida que el tiempo transcurre en comparación con los medios neutro y básico, donde la velocidad es lenta y la extracción es casi nula a lo largo de todo el experimento. Esto puede deberse a que la presencia del ion H^+ es fundamental para la reducción del ion BrO_3^- como se observa en la reacción (5). Se encontró que a medida que se incrementa la concentración del agente complejante (KBr), la extracción de plata aumenta. Esto se debe a un incremento de la solubilidad de la plata al incrementar la concentración del ion bromuro.

Recientemente, se investigó el bromuro cúprico como agente oxidante para la plata. En un estudio realizado para conocer la cinética de disolución de la plata en este sistema, utilizando la técnica de disco rotatorio^[8], pudo observarse que incrementando la velocidad de agitación, aumenta el rango de disolución de plata para velocidades de agitación menores de 1200 rpm, no observándose efecto alguno para velocidades mayores de 1500 rpm. Mediante un análisis de resultados de acuerdo a la teoría de Levich pudo observarse que esta se ajusta a los datos experimentales de manera satisfactoria.

La temperatura tiene un efecto apreciable en la velocidad de disolución ya que un incremento de 10 unidades, incrementa al doble la velocidad de disolución. Se evaluó la energía de activación (45.6056 kJ/mol), lo cual sugiere que la reacción se encuentra bajo un régimen de control por reacción química. La velocidad de

reacción se incrementa linealmente con la concentración de bromuro cúprico. Además se encontró que a medida que se incrementa la concentración del agente complejante (NaBr), la velocidad de disolución de plata aumenta.

De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos, la velocidad de disolución de la plata puede expresarse tomando en cuenta el efecto del bromuro cúprico y el bromuro de sodio como:

$$dC_{Ag}/dt = -k \exp\left[\frac{-10,900}{RT}\right] [CuBr_2] [NaBr] \quad (6)$$

2.2 Generalidades del Carbón Activado.

Existe una extensa variedad de carbones activados. Una característica de los carbones activados es la materia prima de donde proviene, por ejemplo: madera, hueso, cáscara de coco ó hueso de durazno. Las propiedades física y químicas del carbón activado van a depender tanto de la materia prima como también de las condiciones de activación, es decir, la temperatura y el tiempo de duración del proceso.

Diferentes estudios han demostrado que el carbón sinterizado, utilizando diferentes materias primas, tienen la estructura del material orgánico original, por ejemplo, la estructura celular del hueso de durazno y productos de cáscara de coco, están aún presentes en el esqueleto del carbón final^[16].

La estructura del carbón activado es menos perfecta que la del grafito. Basándose en análisis de rayos X, Riley^[17] propuso que existen dos tipos de estructuras para carbón activado. El primer tipo de estructura consiste en una cristalización elemental; ésta se da en dos posiciones análogas al grafito, ya que ambas están compuestas de dos capas paralelas de átomos de carbono ordenadas hexagonalmente. La estructura difiere para el grafito, en que los planos paralelos no están perfectamente orientados con respecto a su eje común perpendicular, el desplazamiento angular de una capa con respecto a la otra al azar y la sobreposición de capas, es otra irregularidad. Para esta disposición Biscoe y Warren^[17], propusieron el término de "estructura turbostática". La orientación mutua de la cristalización elemental es completamente al azar. Sus dimensiones dependen principalmente de la temperatura de carbonización. Los siguientes valores son los que se dan con más frecuencia: largo, de 9 a 12 Å; ancho, (o diámetro, si se supone una sección circular), de alrededor de 20 a 23 Å. Además la cristalización elemental se compone de cerca de tres planos paralelos de capas grafíticas, el diámetro de cada una es de alrededor de nueve veces el ancho del carbón hexagonal.

El segundo tipo de estructura, Riley^[17], la describe como un desorden entre las cavidades entrelazadas del carbón hexagonal, las cuales resultan de la deflexión de los planos de capas de grafito. Esta estructura probablemente se estabiliza por hetero-átomos, en primer lugar por oxígeno, lo cual está bien fundamentado en carbones preparados de materiales con alto contenido de oxígeno.

Investigaciones detalladas, realizadas por Franklin^[17], utilizando rayos X en un carbón preparado por pirólisis de cloruro de polivinilo (PVC) a 1000 °C, han contribuido significativamente a un mejor entendimiento de la estructura de los cristales de materiales carbonáceos. De acuerdo a este trabajo el 65 % de la cantidad de los carbones estudiados se presentan como un arreglo de capas gráficas de un diámetro menor de 16 Å. El resto presenta un alto desorden; el 55 % de las capas gráficas están agrupadas en pares de planos paralelos, distanciados uno de otro por 3.7 Å. Para los pequeños ángulos dispersos de rayos X, Franklin concluyó que la distancia aproximada entre los cristales elementales era aproximadamente de 25 Å. El carbón obtenido en PVC no es grafitizado (es decir, no tiene la forma tridimensional de la estructura gráfica), hasta altas temperaturas como 3000 °C; ésta es una sustancia muy dura con baja expansión térmica. Todo esto indica un considerable enlace entre los elementos cristalinos.

Como se ha mencionado, dependiendo de la materia prima, serán las atribuciones que tenga el carbón para su aplicación. Por ejemplo, el carbón

obtenido de cáscara de coco se utiliza ampliamente en la purificación de aire, esto debido a que la mayoría de los poros en este carbón activado son pequeños, aproximadamente de 20 Å de diámetro, los cuales son aptos para la adsorción de pequeñas moléculas de gas. Carbones manufacturados a partir de carbón bituminoso tienen poros cuyo diámetro varía hasta 1000 Å, estos carbones pueden remover moléculas grandes de líquidos.

Para que la adsorción ocurra, la molécula debe alcanzar la superficie interna de la partícula de carbón llevándose a cabo una difusión a través de los poros. Como resultado, la estructura de los poros tiene una marcada influencia sobre la cinética de adsorción, ejemplo de esto es la velocidad a la que las moléculas son adsorbidas.

Además de que la estructura de los poros está relacionada con el tiempo y la temperatura de activación, también influye en la fuerza mecánica de los gránulos de carbón activado.

Las propiedades de adsorción del carbón activado son determinadas no sólo por su estructura porosa, sino también por su composición química. El componente decisivo de la fuerza de adsorción sobre la superficie carbonácea altamente ordenada es el componente de dispersión de las fuerzas de Van Der Waals. El disturbio de la estructura microcristalina elemental como, por ejemplo, la presencia de capas

imperfectas grafíticas en los cristales, originan cambios del arreglo de la nube de electrones en el esqueleto del carbón^[17]. Como resultado, valencias incompletas saturadas o aparición de electrones no apareados, influyen en las propiedades de adsorción del carbón activado, especialmente para sustancias polares o polarizables.

Otro tipo de disturbios se relaciona con la presencia de hetero-átomos en la estructura del carbón. El efecto de modificación de la superficie de adsorbentes carbonáceos por diferentes hetero-átomos o grupos, sobre las propiedades de adsorción han sido estudiados sistemáticamente por Kiselev et al^[17]. El carbón activado que contiene dos tipos de mezclas, una de ellas representada por elementos enlazados químicamente, en primer lugar oxígeno y nitrógeno; originados del material inicial y los cuales permanecen remanentes en la estructura del carbón activado como resultado de una carbonización imperfecta, o se encuentran enlazados químicamente a la superficie durante la activación como en el caso del cloro, cuando se usa para la activación o subsecuentemente, en la oxidación de la superficie del carbón por oxígeno o vapor de agua. Otra especie consiste en cenizas que no son parte orgánica del producto. El contenido de cenizas y su composición varía ampliamente con el tipo de carbón activado^[17]. Como ejemplo se cita un análisis de carbón activado, preparado de cáscara de coco que contiene 3.5% de ceniza, incluyendo un porcentaje del orden de 10^{-1} de potasio, aluminio, sodio y óxidos de hierro, así como una más pequeña cantidad de magnesio, calcio, boro, cobre, zinc, estaño y trazas de litio, rubidio y plomo. Los incrementos relativos en el contenido

de cenizas en el carbón activado dependen del grado de carbonización y activación del material inicial, durante el cual, el carbón tratado está siendo removido. La ceniza puede extraerse completamente del carbón activado con ácido fluorhídrico o clorhídrico. No obstante el ácido fluorhídrico, causa cambios en la porosidad y cataliza la formación de complejos de oxígeno sobre la superficie del carbón activado^[17]. El ácido clorhídrico, también incrementa la concentración de complejos superficiales que contienen oxígeno.

Para algunos propósitos solo es necesario remover ciertos componentes de la ceniza, por ejemplo, la extracción de estos con ácido acético o agua. Para un carbón activado comercial de cáscara de coco, una investigación del cambio del contenido de ceniza con el método de extracción da los siguientes resultados: El adsorbente inicial tiene el 4.3% de ceniza, y después de la extracción con agua destilada en un aparato Soxhlet éste se reduce a 3.1%, después de otra extracción con ácido acético, seguida con un lavado con agua destilada este porcentaje se reduce a 1.7%, finalmente, después de una extracción con ácido fluorhídrico y un lavado con agua destilada, solo queda un 0.2 %. De estos estudios se concluye que el agua remueve los compuestos solubles de metales alcalinos, ácido acético, compuestos de metales de las tierras alcalinas, hierro, ácido fluorhídrico y el resto de los componentes. Un carbón activado con un bajo contenido de cenizas puede prepararse a partir de sucrosa. Carbones activados muy puros pueden fabricarse por carbonización de resinas fenolaldehidas y cloruro de polivinilo; cuyos contenidos de cenizas son del

orden porcentual de 0.01 o menores^[17].

Las características de adsorción del carbón activado son influenciadas de manera significativa por pequeñas cantidades de ceniza^[17]. Esta también tiene un efecto catalítico en la activación con vapor. El hierro y otros componentes tienen un fuerte efecto catalítico en reacciones de materiales carbonáceos con dióxido de carbono. Por otra parte la adsorción de gases es influenciada por el contenido de cenizas en el carbón activado. La dependencia de la adsorción en presencia de cenizas fue observada por primera vez en sustancias polares, como dióxido de azufre, vapor de agua y ácido acético. Los incrementos de adsorción se explican por el hecho de que las cenizas causan defectos en la estructura elemental del carbón activado, defectos por oxígeno quimiadsorbido lo cual conduce a incrementos en la adsorción de sustancias polares.

Las modificaciones del carbón activado, producidas por la introducción de compuestos inorgánicos (AlCl_3 , NaOH y Na_2S_3) dentro de su estructura, dan como resultado un decremento en la adsorción de nitrógeno. Cuando se incrementa la cantidad de sodio y potasio dentro de la estructura del carbón activado, la adsorción de gases se incrementa y luego disminuye. Las cuantificaciones de porosidad y área indican que la introducción de sodio y potasio causan la formación de nuevos poros, aparentemente debido a que estos elementos ocupan sitios entre las capas gráficas de los cristales elementales^[17].

La presencia del oxígeno e hidrógeno causa gran efecto sobre la adsorción y otras propiedades del carbón activado. Estos elementos son combinados con átomos de carbono mediante enlaces químicos y difieren de la ceniza en la formación de una parte orgánica de la estructura química del carbón activado. De acuerdo a Kipling^[17], los átomos de oxígeno e hidrógeno son componentes constantes esenciales de un carbón activado con propiedades de adsorción, y la superficie de tales materiales es considerada como hidrocarburo de superficie modificada en algunos puntos por compuestos de oxígeno. Un carbón activado preparado a partir de sucrosa a 550 °C contiene aproximadamente 30 átomos de hidrógeno y 9 átomos de oxígeno por cien átomos de carbono. Un carbón activado preparado por la acción de oxígeno a temperatura elevada, contiene 18 % en peso de oxígeno, es decir, una porción de un átomo de oxígeno por 6 átomos de carbono. Se puede preparar carbón activado libre de oxígeno y con solo una pequeña cantidad de hidrógeno por medio de pirólisis de cloruro de polivinilo o resina fenolaldehídica. En contacto con el aire, estos carbones ligan oxígeno por quimisorción.

De acuerdo con la teoría de heterogeneidad de superficies sólidas, formulada primeramente por Taylor^[17], el oxígeno, el hidrógeno, y otros hetero-átomos, en materiales carbonáceos se enlazan en átomos de carbono con formación de bordes y esquinas en cristales grafiticos elementales, debido a que las valencias de estos átomos no están completamente saturadas por interacción con los átomos de carbono circundantes y su reactividad es alta. De manera similar los átomos de carbón en

posición defectuosa del cristal entrelazados, por ejemplo, los carbonos hexagonales deformes o incompletos son más reactivos y por consiguiente tienden a reducir su energía de potencial para formar enlaces con el oxígeno y otros elementos. Estos carbonos ricos en energía causan también otros efectos: saturan sus valencias residuales por enlace a uno de los cristales elementales cercanos, enlazan productos de descomposición térmica durante el proceso de carbonización, forman centros de concentración por difusión de impurezas cuando el material carbonáceo se sujeta a alta temperatura, proveen de sitios donde las moléculas de agua, amoníaco, y otras sustancias polares se adsorben; reducen la movilidad de nitrógeno adsorbido físicamente.

El principal interés metalúrgico en el carbón activado, es la adsorción de metales preciosos en soluciones acuosas. El carbón activado se ha conocido a través de la historia como un adsorbente y su uso en forma de madera carbonizada data desde hace varios siglos. Los Egipcios lo utilizaron alrededor de 1500 años A.C., como un adsorbente para propósitos medicinales y también como un agente purificante. Los antiguos Hindúes, filtraban el agua destinada para beber a través de carbón.

La base para una producción industrial de carbón activado, se estableció alrededor de 1900 para reemplazar el carbón de hueso en el proceso de refinación del azúcar. Este carbón activado fue preparado por la acción de cloruro de zinc en

madera y otros materiales de alto contenido de carbono. A mediados del siglo XIX, el carbón activado se usó en el tratamiento de agua potable en Inglaterra y desde entonces ha tenido una gran aplicación en este campo.

Durante la Primera Guerra Mundial, fue necesaria la manufactura de un carbón activado con una mayor calidad para la adsorción de gases, ya que requería ser usada en máscaras para protección contra los gases venenosos. A finales de 1930 el carbón activado fue fabricado a partir de aserrín mediante activación química con cloruro de zinc, para la recuperación de solventes volátiles y para remover el benceno de las torres de gas.

El uso del carbón activado para la recuperación de metales preciosos a partir de soluciones de cloruro de oro y plata fue descubierto en 1847^[9] y en 1880 Davis^[10], patentó el proceso en el cual utilizaba carbón de madera para la recuperación de oro a partir de licores obtenidos de la lixiviación con cloro. En 1890, McArthur y los hermanos Forrest, establecieron que el cianuro era un buen agente lixivante para el oro^[11] y cuatro años más tarde Johnson^[12], patentó el uso del carbón de madera para la recuperación de oro a partir de soluciones de cianuro.

En el año de 1917, el carbón fue usado para la recuperación de oro en la planta Yuanmi en Australia Occidental. En este proceso, las soluciones ricas se bombeaban a través de tres filtros en serie, que contenían carbón de madera. Sin

embargo este carbón tenía la desventaja de poseer una baja capacidad de adsorción, además de desconocimiento del procedimiento en el proceso de despojamiento. Como consecuencia de lo anterior, el oro debía ser recuperado quemando el carbón.

En años recientes, se han sugerido varias técnicas para la recuperación de oro y plata usando carbón activado como adsorbente a partir de soluciones de cianuro, tiourea y haluros. El método que ha ganado gran aceptación, es el proceso de carbón en pulpa (CIP). En este proceso se agrega carbón granulado directamente a las pulpas en flujo a contracorriente. El carbón cargado de valores se retiene en una criba al final del circuito. La oficina de Minas de los Estados Unidos de Norteamérica (Bureau of Mines), bajo contrato de la Compañía Getchel Zadra^[13,14], desarrollo este proceso en 1956. Años después esta tecnología fue utilizada por primera vez en una instalación industrial, y así en 1973 la compañía Homestake Mining, arrancó una planta utilizando el proceso CIP^[15]. A partir de entonces este proceso se ha ido extendiendo a otras plantas a través de todo el mundo.

En México la primera instalación industrial que utilizó el proceso CIP para el tratamiento de soluciones cianuradas de plata, es la Compañía Real de Catorce, en San Luis Potosí. El proceso utiliza seis tanques en la sección de adsorción, posteriormente tiene una etapa de despojamiento y finalmente se recuperan los valores mediante electrólisis. El carbón se retorna al circuito de adsorción después de su lavado y reactivación.

2.3 Aplicación del Carbón Activado en la Adsorción de Metales Preciosos.

El proceso de recuperación de oro y plata con carbón activado ha ganado bastante importancia en los últimos años. La principal ventaja de este método de recuperación es que se puede tratar mineral fino sin que se lleve a cabo una separación mecánica de la solución cargada con oro, evitándose con esta técnica el costo de filtración o el sistema de decantación a contracorriente. Este método es atractivo para el tratamiento de minerales lamosos en los cuales es difícil la separación sólido-líquido.

El proceso de adsorción en carbón activado para la concentración de iones de oro y plata consiste de tres operaciones básicas las cuales se describen a continuación:

1. **Adsorción** El oro y la plata de la solución se cargan en el carbón.
2. **Elución** El despojamiento de los iones metálicos, se realiza haciendo pasar un pequeño volumen de una solución eluyente, acondicionada para disolver los iones metálicos.
3. **Recuperación** Deposición electrolítica o cementación de oro y plata de la solución concentrada. La solución agotada se retorna al proceso.

El carbón activado tiene una aplicación directa en la recuperación de oro a partir de soluciones de cianuro de oro. Las propiedades del carbón garantizan esta aplicación para la recuperación de metales preciosos a partir de soluciones de bromuro.

2.3.1. Sistema cianuro.

Muir^[21], realizó un estudio cinético para la recuperación de oro a partir de soluciones de cianuro utilizando carbón activado.

Las velocidades y el equilibrio de la adsorción de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ dependen de los sitios activos disponibles en el carbón activado.

Ladeira et al ^[22], encontraron que la concentración de oro en solución no tiene ningún efecto sobre la velocidad de adsorción en un rango de 1 a 4 ppm, lo cual está totalmente de acuerdo con Fleming et al^[27], quienes observaron que para soluciones diluidas, el proceso de adsorción no se ve influenciado por la concentración de oro en solución.

Sin embargo cuando al mismo carbón se le añade una solución de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ a pH de 10, no es posible apreciar el oro depositado.

En cuanto a la temperatura, las isotermas mostraron una disminución en la actividad del carbón activado cuando esta aumenta, esto puede ser debido a la oxidación de la superficie del carbón activado y esto inhibe la adsorción del complejo oro-cianuro^[21].

Ladeira^[22], pudo observar que las extracciones son similares para temperaturas en un rango de 25 a 50 °C, no así para altas temperaturas, mayores de 50 °C, ya que la velocidad de adsorción disminuye considerablemente cuando aumenta la temperatura. El valor promedio de la energía de activación aparente fue de 2.4 KCal/ mol, este resultado está de acuerdo con Fuerstenau et al y Fleming et al^[27]. Los cuales reportan valores de 2.0 y 2.6 KCal/ mol respectivamente. La baja energía de activación indica que la reacción está controlada por difusión en la capa límite o por difusión en los poros de las partículas de carbón.

No se observó efecto en el pH en un rango de 10 a 12, estos datos están de acuerdo con la literatura^[22]. La cual muestra que el pH no tiene una gran influencia en la adsorción de oro en este rango de valores, pero a pH menores de 6 la influencia es drástica y los valores de recuperación son bajos.

En cuanto al efecto de la velocidad de agitación, Ladeira et al^[22], estableció que para un rango de velocidad de 150 a 1800 rpm, entre 150 y 900 rpm existe un incremento en la velocidad de extracción final y al inicio para velocidades arriba de

900 rpm, esto puede ser debido al rompimiento de la partícula y por consecuencia aumento del área superficial del carbón.

Para la recuperación de oro, a partir de soluciones de cianuro se pudo observar que la velocidad de adsorción alcanza el equilibrio aproximadamente a las 7 horas de estar en contacto el carbón con la solución.

2.3.2. Sistema tiourea.

Investigaciones recientes muestran una alta recuperación de oro a partir de soluciones de ácidos de tiourea. Sin embargo, una de las mayores desventajas encontradas en este proceso, se relaciona con la pérdida de tiourea (alrededor de 30 %) en la solución de lixiviación debido a la adsorción en el carbón activado^[23].

Fleming (1987)^[28], estableció que el complejo oro-tiourea es cargado en el carbón, sin que exista un cambio químico, es decir, como especies $\text{Au}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_2^+$. Un exceso de tiourea en la solución provoca un efecto deteriorante en la adsorción del complejo oro-tiourea, y la capacidad es reducida arriba del 90% debido a la oxidación producida por el exceso de tiourea, produciendo azufre elemental. Estableciéndose entonces que la precipitación del azufre elemental en la superficie del carbón afecta la recuperación del oro.

Almazán ^[24] estudió la adsorción de plata en soluciones ácidas de tiourea utilizando carbón activado, mostrando que, a velocidades mayores de 400 rpm, cuando la pulpa es homogénea, no hay un cambio significativo en la adsorción. Tampoco se observó un cambio significativo en la velocidad de adsorción al variar la temperatura en el rango de 30 a 60 °C. Se pudo apreciar que la concentración de tiourea libre debe mantenerse lo más baja posible para minimizar su competitividad con la adsorción de los complejos tiourea-plata. En este estudio pudo apreciarse que la velocidad de adsorción de la plata aumenta con el incremento de la cantidad de carbón.

2.3.3. Sistema cloruro

Cuando el carbón activado es añadido a la solución conteniendo AuCl_4^- a $\text{pH} < 6$, el oro metálico se deposita visiblemente en el carbón. Claramente el oro se reduce en la superficie del carbón y no migra hacia el interior de la estructura del carbón^[23].

Sun et al^[25], establecieron que para el análisis del tamaño de partícula, la velocidad de adsorción aumenta con la disminución del mismo. En cuanto al análisis de la cantidad de carbón se pudo apreciar que la adsorción aumenta cuando aumenta la cantidad de carbón activado en la solución, esto debido a que aumenta

la disponibilidad de sitios activos. Con respecto al exceso de iones cloruro en la solución se observó que no existe un efecto significativo en la adsorción de oro, no obstante en presencia de iones férrico en solución, los cuales se utilizaron para analizar las impurezas en la solución, estos provocaron una marcada disminución en la adsorción de oro. También a diferentes concentraciones de oro en la solución, la cinética de adsorción resultó ser de primer orden. Un análisis con espectrofotometría reveló la naturaleza del oro depositado, el examen de los productos de reducción mostró que el oro se depositó como partículas de oro metálico sobre la superficie externa del carbón.

2.3.4. Sistema Bromuro.

Entre los procesos más comunes para la recuperación de oro a partir de soluciones de bromuro de oro, se han utilizado los métodos convencionales de adsorción en carbón activado y resinas de intercambio iónico.

En los resultados del estudio realizado por Pesic y Storhok^[18] para la adsorción de oro a partir de soluciones de bromuro de oro se encontró que, este se adsorbe en el carbón activado en su forma iónica original; esto en contraste con la adsorción de oro a partir de soluciones de cloruro donde el oro se adsorbe en su forma elemental. Por otro lado la adsorción sigue una reacción de primer orden y

como tal, es una función del tamaño de partícula y de la cantidad de carbón. En cuanto al pH, este no presenta ningún efecto en la adsorción a valores menores de 6, sin embargo a valores superiores se presenta un efecto negativo en la adsorción. La temperatura, en un rango de 25 a 45 °C, tiene un efecto muy pequeño durante la adsorción de oro a pH bajos. A pH cercanos a 8, se tienen pequeños valores de energía de activación (menor de 20 KJ/mol), en este valor de pH la capacidad de carga se incrementa; 27 a 64 kg por tonelada de carbón a 25°C. En ausencia de bromo libre la capacidad de carga se incrementa dramáticamente, de 174 a 315 kg por tonelada de carbón^[18].

También se estudió el efecto de la concentración de bromo en la solución a pH = 8 encontrándose una mínima adsorción, y disminuyendo aún más cuando, se aumenta la cantidad de bromo en solución. Para soluciones con un pH igual a 1 se encontró que la adsorción disminuye con respecto a la concentración de bromo.

El efecto negativo en la adsorción es causado por la rápida y fuerte adsorción de bromo en la superficie del carbón activado, el cual reduce la disponibilidad de sitios activos para la adsorción de bromuro de oro^[18].

Pesic et al^[19], realizaron un estudio para la disolución y adsorción de oro a partir de minerales preoxidados utilizando el proceso de oxidación a presión. Se

analizaron tres minerales diferentes, minerales de oro y plata, telururos de oro y plata y oro libre de plata.

El experimento consistió de tres etapas, en la primera se llevó a cabo la oxidación a presión, en la segunda etapa la lixiviación con bromo y una tercera etapa de adsorción.

La adsorción en carbón activado se realizó a una temperatura de 40 °C, con un gramo de carbón, en un volumen de un litro, durante tres horas y a una velocidad de agitación de 500 rpm.

La etapa de recuperación de oro fue estudiada como una función de: cantidad de carbón, temperatura de adsorción y tiempo. Se examinaron tres diferentes cantidades de carbón, obteniéndose una recuperación de 94.54% para dos gramos por litro, 92.61% para un gramo y 80.63% para 0.5 gramos de carbón. La recuperación de oro con carbón activado alcanza el equilibrio a las dos horas. Por lo tanto, la cantidad de carbón es mucho menor en sistema de bromuro, un gramo por litro, en comparación con el sistema cianuro, 10-20 gramos por litro. Por otro lado, la cinética de reacción es mucho más rápida para el bromo en relación al sistema de cianuro^[19].

Mensah-Biney et al^[20], realizaron un estudio para conocer las características de carga del oro en el carbón activado, donde se evaluó efecto de la temperatura, concentración de iones bromuro en solución, tiempo y concentración inicial de oro en solución. También se pudo establecer un mecanismo de reacción para la adsorción.

En la evaluación de estos parámetros se observó que la temperatura tiene un efecto significativo, ya que la capacidad de carga aumenta cuando esta se incrementa en un rango de 30 a 40 °C, especialmente durante el período inicial de carga. Sin embargo el efecto fue tan significante a lo largo del período de carga. Probablemente, debido al efecto predominante de la reacción de reducción en la carga durante este período, a altas temperaturas, la velocidad de reducción es rápida y el sistema tiene el potencial de aprovechar la aparente capacidad de saturación en un corto tiempo.

La capacidad de saturación fue de 1200 Kg/ton en un rango de tiempo de 120 - 168 horas.

En el efecto de la concentración inicial de oro se encontró que la capacidad de saturación aparente decrece con el incremento de la concentración inicial de oro en solución. Esta relación mostró ser inconsistente en la adsorción normal desarrollada, lo cual puede deberse a la alta concentración de bromuro asociada a

la alta concentración de oro, esto quedó demostrado cuando se analizó el efecto del bromo sobre la adsorción, determinándose que el bromo inhibe la capacidad de carga del carbón para las especies de oro-bromo. El exceso de bromo causa que la superficie del carbón se oxide y la adsorción de $(\text{AuBr}_2)^-$ en la superficie se vea afectada negativamente.

Basándose en los resultados mostrados y en otros datos presentados anteriormente (Mensah-Biney, 1991), el mecanismo para la carga de oro en el carbón activado se propuso de la siguiente manera:

- El transporte de masa de $(\text{AuBr}_2)^-$ de la solución a la superficie del carbón.
- La reducción de Au (III) a oro metálico en la superficie del carbón.

Estos autores propusieron que el mecanismo predominante es el transporte de masa, demostrándose con micrografías de SEM del carbón cargado. La velocidad de carga por transferencia de masa, disminuye considerablemente a medida que la carga aumenta y el mecanismo de reacción tiene una influencia predominante en el mecanismo de carga.

El mecanismo de carga es similar al del sistema de cianuro^[19].

III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Materiales y Equipo.

3.1.1 Solución de Lixiviación.

Para la realización de este trabajo, se utilizaron soluciones sintéticas de plata grado reactivo 99.99 % de pureza, buscando eliminar posibles interferencias debido a impurezas, y con esto asegurar que la información obtenida en la experimentación se debe particularmente al comportamiento propio del metal, en un medio de lixiviación consistente de bromuro cúprico y bromuro de sodio.

Se colocaron 200 ml de solución de bromuro cúprico-bromuro de sodio en un reactor de 500 ml, el cual se colocó en un baño con temperatura controlada. Cuando se ha alcanzado la temperatura deseada se le añade una determinada cantidad de plata. Se burbujea la solución previamente con nitrógeno para mantener una atmósfera inerte antes de estar en contacto con la plata. La velocidad de agitación se ajusta a 1200 rpm por espacio de tres horas.

3.1.2. Reactivos utilizados en las pruebas de adsorción de plata en carbón activado.

- Bromuro cúprico grado reactivo, marca Aldrich.
- Bromuro de sodio grado reactivo, marca Aldrich.
- Plata metálica grado reactivo, 99.99 % de pureza.
- Estándar de plata.
- Estándares para medidor de pH 4 y pH 7
- Gas nitrógeno
- Carbón activado de coco, fabricado por Spectrum, tamaño promedio - 14+20 mallas, área superficial 664 m²/gr, volumen de poros 0.57 cm³/gr y un radio promedio de poro de 17 Å.

3.1.3 Equipo utilizado en la adsorción de plata en carbón activado

- Reactor de vidrio marca Ace Glass Incorporated, de 500 ml con tapa de cuatro orificios.
- Impulsor con controlador de velocidad marca T Line Laboratory Stirrer, modelo 102, con dos rangos de velocidad, 500-7500 y 50-750 rpm.
- Baño para regular la temperatura equipado con un controlador GCA Precisión PHC 115 V 50-60 Hz, 1050 W, con un rango de 0 a 100 °C.
- Reóstato marca Staco Energy Products Co., corriente de entrada 120 V, Corriente de salida 0-120/140 V, 10 A y 50/60 Hz.

3.1.4. Equipo utilizado en el análisis.

Los análisis de las muestras experimentales se realizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer, modelo 2380 con lámpara de cátodo hueco de plata y flama de aire acetileno, a una longitud de onda de 248.1 nm.

3.2. Pruebas de Recuperación

Para la elaboración de este trabajo se utilizaron soluciones sintéticas de plata, preparadas a partir de soluciones de lixiviación de plata en bromuro cúprico y utilizando carbón activado de coco como medio adsorbente.

Los experimentos se realizaron en un reactor de vidrio, con tapa de cuatro orificios, el cual fue colocado en un baño para regular la temperatura.

La Figura 1 muestra un diagrama esquemático del sistema experimental.

Se colocan 200 ml de solución de bromuro de plata en el reactor, el cual se mantiene a temperatura controlada. Cuando la solución alcanza la temperatura deseada se añade al reactor una cantidad determinada de carbón activado en pulpa y se somete posteriormente a una agitación mecánica a la velocidad previamente seleccionada.

Para los distintos análisis se realizaron muestreos de la solución a un tiempo determinado. La concentración de la plata se determinó por espectrofotometría de absorción atómica.

3.3. Análisis Químico

Para el análisis de las muestras experimentales se utilizó espectrofotometría de absorción atómica, utilizando para la calibración, tres estándares de plata, 4, 8 y 16 ppm en cada una de las diferentes concentraciones utilizadas en la experimentación.

Para obtener la lectura de las muestras, el espectrofotómetro se ajustó a una longitud de onda de 328.1 nm y una apertura de 0.7 nm, utilizando una lámpara de cátodo hueco de plata a 16 mA.

Se midió la concentración directamente de las muestras extraídas del reactor. En los casos en que la concentración de plata rebasó las 16 ppm se hicieron diluciones, con sus correspondientes ajustes a la lectura.

3.4. Variables a Estudiar.

Los parámetros que se evaluaron fueron los siguientes:

Velocidad de agitación: 400, [600], 800 y 1000 rpm.

Concentración de plata en solución: 20, 40, [50], 60, 80 y 100 ppm.

Temperatura: [30], 40, 50, 70 y 80 °C.

Concentración del ion cúprico en solución: [0.01], 0.05 y 0.5 M.

Concentración del ion bromo en solución: [1.5], 1.75 y 2.0 M.

Cantidad de carbón activado: 1, [2] y 3 g.

[] Valores que se mantuvieron constantes en el resto de las evaluaciones.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION

4.1. Capacidad de Adsorción.

La capacidad de adsorción se calculó mediante la isoterma de Langmuir.

$$\frac{C_{ads}}{n_s} = \frac{bC^*}{1+bC^*}$$

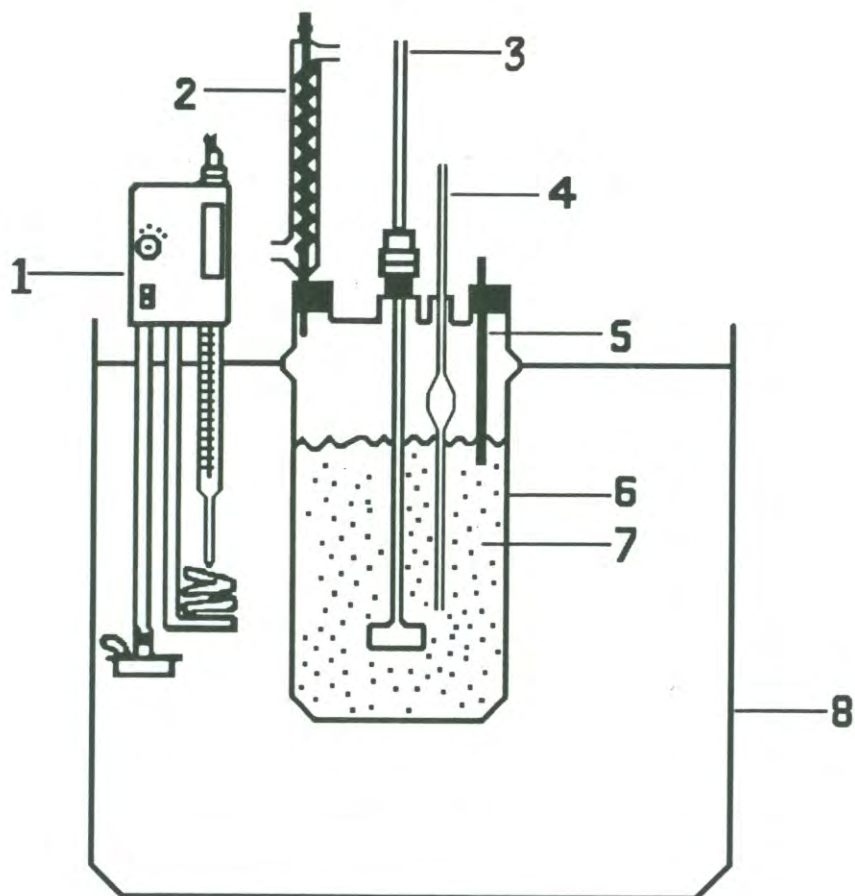
- n_s = Número de sitios disponibles para la adsorción.
- b = Constante relacionada con la energía de adsorción.
- C^* = Concentración de plata en el equilibrio.
- C_{ads} = Cantidad de plata adsorbida.

Dicha isoterma se linealiza de la siguiente manera:

$$\frac{C^*}{C_{ads}} = \frac{1}{bn_s} + \frac{C^*}{n_s}$$

Para este análisis se utilizaron los datos de equilibrio generados por los experimentos de la adsorción de plata a diferentes concentraciones en solución y los originados por las pruebas variando la cantidad de carbón activado.

Como se observa en la Figura 1, se ajustan satisfactoriamente los datos a la linearización de la isoterma, demostrando que la adsorción es del tipo monocapa pudiéndose determinar que la capacidad de adsorción, n_s , es de 6.25 mg Ag/g carbón.



1) Controlador de temperatura.

2) Refrigerante.

3) Agitador.

4) Tubo muestreador.

5) Termómetro

6) Reactor.

7) Carbón activado

8) Baño de agua

Figura 1. Diagrama esquemático del equipo experimental.

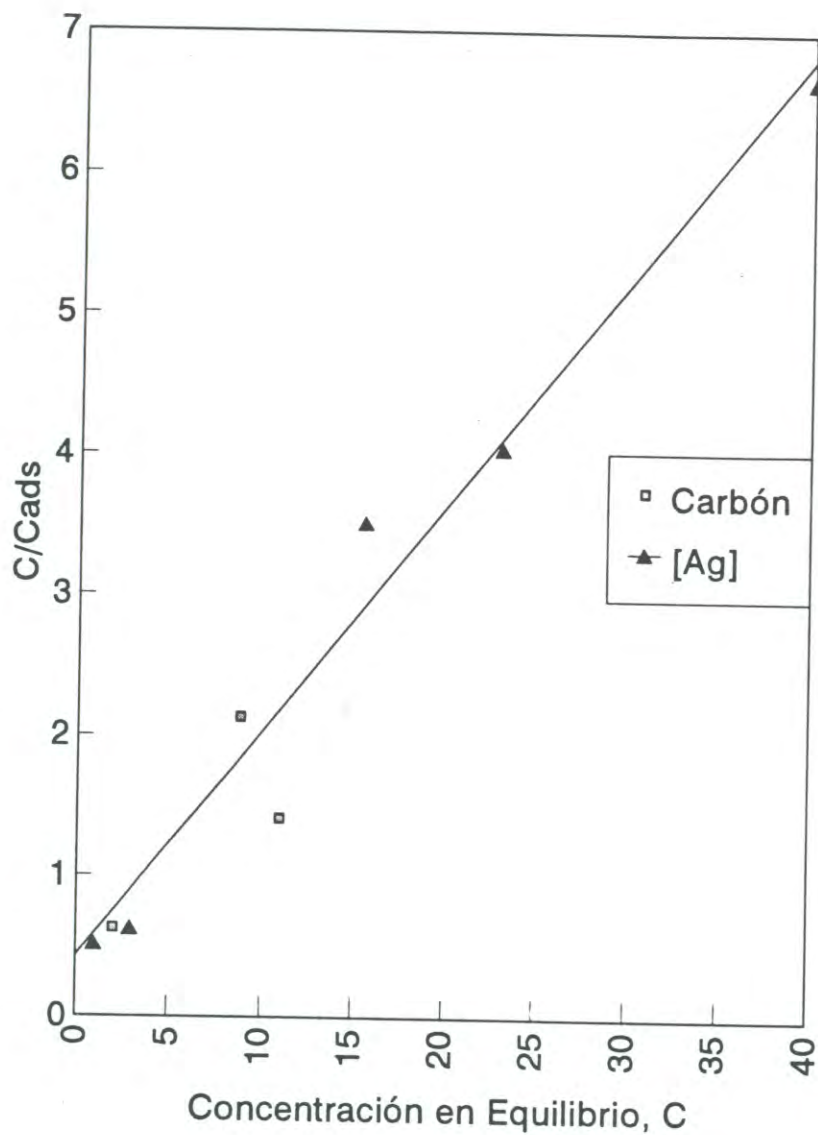


Figura 2. Isoterma de Langmuir linealizada. $[Ag] = 50$ ppm; $[Br^-] = 1.5$ M; $T = 30$ °C.

4.2. Química de la Solución.

En el proceso de lixiviación de plata con bromuro cúprico y bromuro de sodio, los iones cúpricos actúan como agentes oxidantes para la plata, mientras que los iones bromuro actúan como agentes complejantes. En solución existen iones bromuro en exceso, lo que da estabilidad a la plata disuelta en el sistema.

La oxidación de la plata ocurre cuando los iones cúpricos atacan la superficie de la plata oxidándola de Ag° a Ag^+ , y reduciéndose el cobre de Cu^{2+} a Cu^+ . Paralelo a esto, ocurre la reacción de complejación que se da entre la plata oxidada y los iones bromuro presentes en la solución, para dar como producto, las especies estables en la solución, lo cual puede corroborarse por medio de un diagrama de distribución de especies. Este muestra las especies solubles en solución acuosa para un rango determinado de concentración del agente complejante, tal como lo indica la Figura 3^[29], las especies que predominan en la solución son AgBr_4^{-3} y AgBr_3^{-2} .

El exceso de iones bromuro y la presencia de iones cúprico en solución causan la formación de bromuro cúprico. Sin embargo el exceso de ion bromuro puede asegurar que la mayor cantidad tanto de ion cúprico permanece en solución como complejo de bromuro, como puede apreciarse en el diagrama de distribución de especies cúprico-bromo, en la Figura 4^[29], donde las especies que predominan son: CuBr_3^- , CuBr_4^{-2} y CuBr_5^{-3} para el diagrama cúprico-bromo.

Es importante notar que todas las especies metálicas, Cu^{2+} y Ag^+ , se encuentran en forma de aniones, y en consecuencia pueden competir por los mismos sitios positivos del carbón.

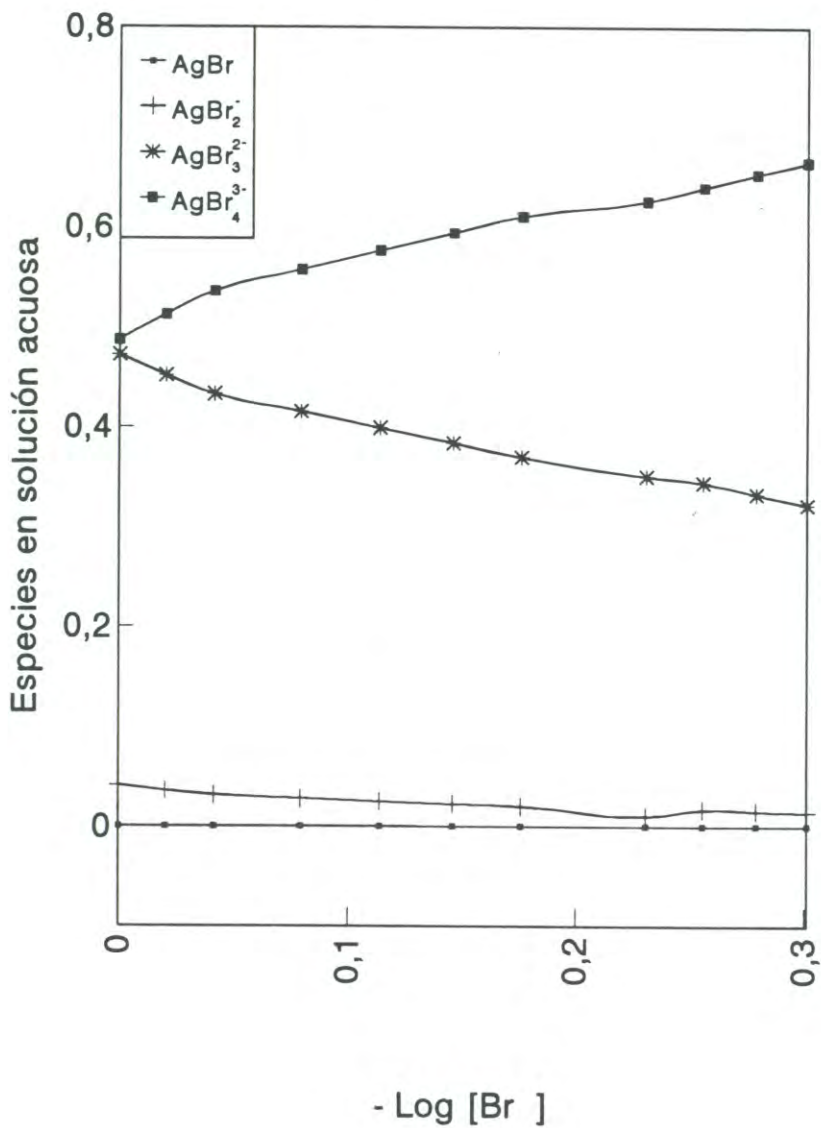


Figura 3. Diagrama de distribución de especies bromo-plata. $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $[\text{Br}^-] = 1.0 \text{ a } 1.5 \text{ M}$.

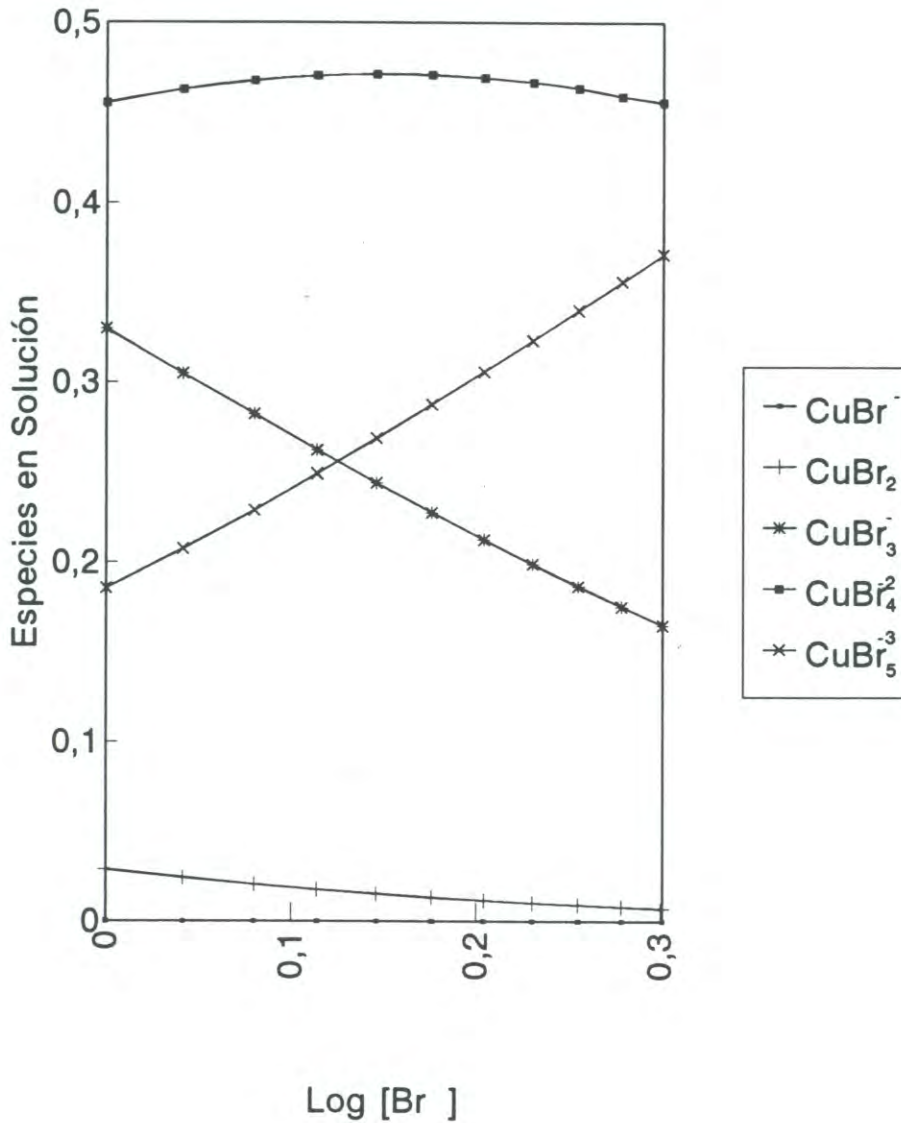


Figura 4. Diagrama de Distribución de Especies bromo-cúprico. $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $[\text{Br}^-] = 1.0 - 1.5 \text{ M}$.

4.3 Efecto de la Velocidad de Agitación.

El objetivo de la evaluación de este parámetro, fue encontrar la velocidad sobre la cual la resistencia por transferencia de masa externa ya no controla el proceso.

Las pruebas realizadas se hicieron con un agitador mecánico conectado a un reóstato para el control de las revoluciones por minuto. Los valores que se tomaron para el estudio fueron: 400, 600, 800 y 1000 rpm.

Los datos obtenidos se muestran en la Figura 5, donde se observa que la velocidad de adsorción de los complejos de plata en carbón activado no presenta cambios significativos en el rango de velocidades estudiado, a partir de los 600 rpm, manteniéndose la velocidad constante a 600 rpm en el resto de las pruebas experimentales.

Para efecto de la adsorción pudo observarse que no se requieren una velocidad alta de agitación, pero si la necesaria para mantener las partículas en suspensión minimizando su asentamiento en el fondo del reactor.

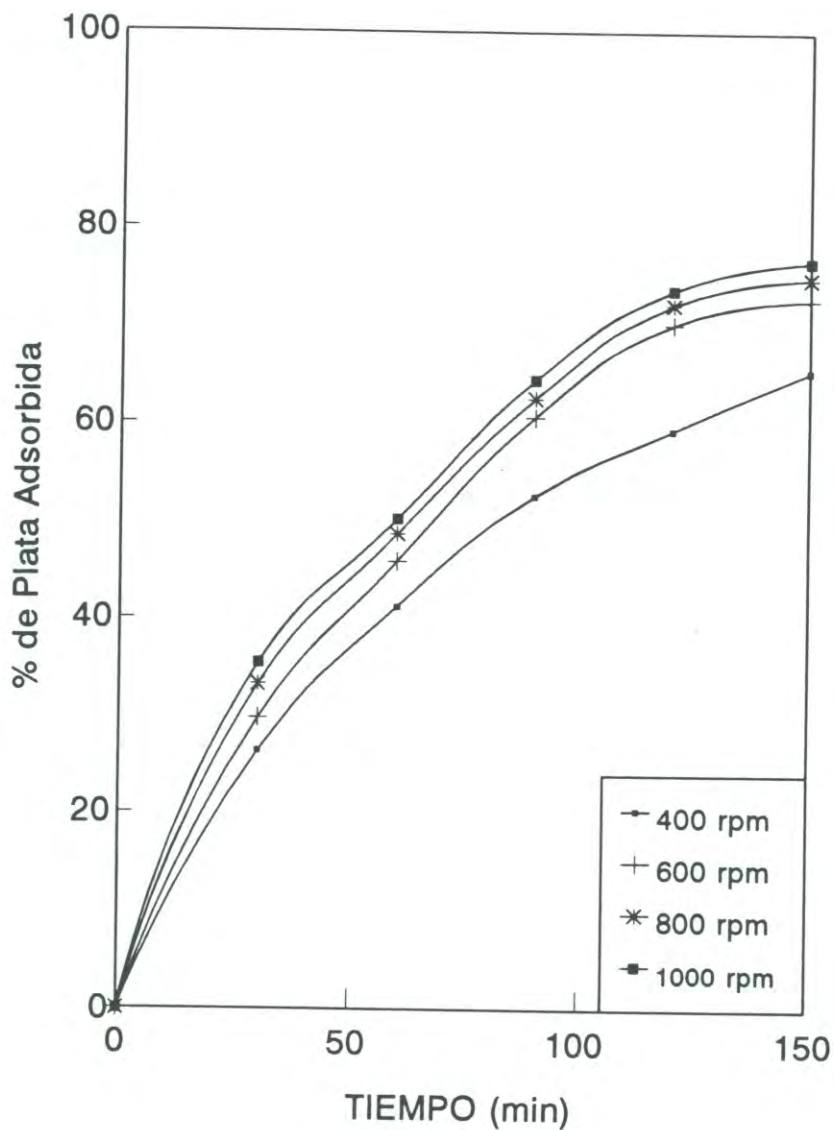


Figura 5. Efecto de la velocidad de agitación en la adsorción de plata.
[Ag] = 50 ppm; [Br⁻] = 1.5M; 2 gramos de carbón y T = 30 °C

4.4. Efecto de la Cantidad de Carbón Activado.

Se realizaron corridas con distintas cantidades de carbón en los siguientes rangos: 1, 2 y 3 gramos, manteniendo el resto de los parámetros constantes.

Los resultados de estas pruebas se muestran en la Figura 6, observándose que la recuperación de plata se incrementa considerablemente con el aumento de la cantidad de carbón. Esto se debe al correspondiente incremento del área de contacto, aumentando con ello la disponibilidad de sitios de adsorción.

Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos en otros sistemas de recuperación de metales preciosos a partir de soluciones de cianuro [21, 22], de soluciones ácidas de tiourea^[23, 24], de soluciones de cloruro^[25] y de soluciones de bromuro^[19, 20, 21].

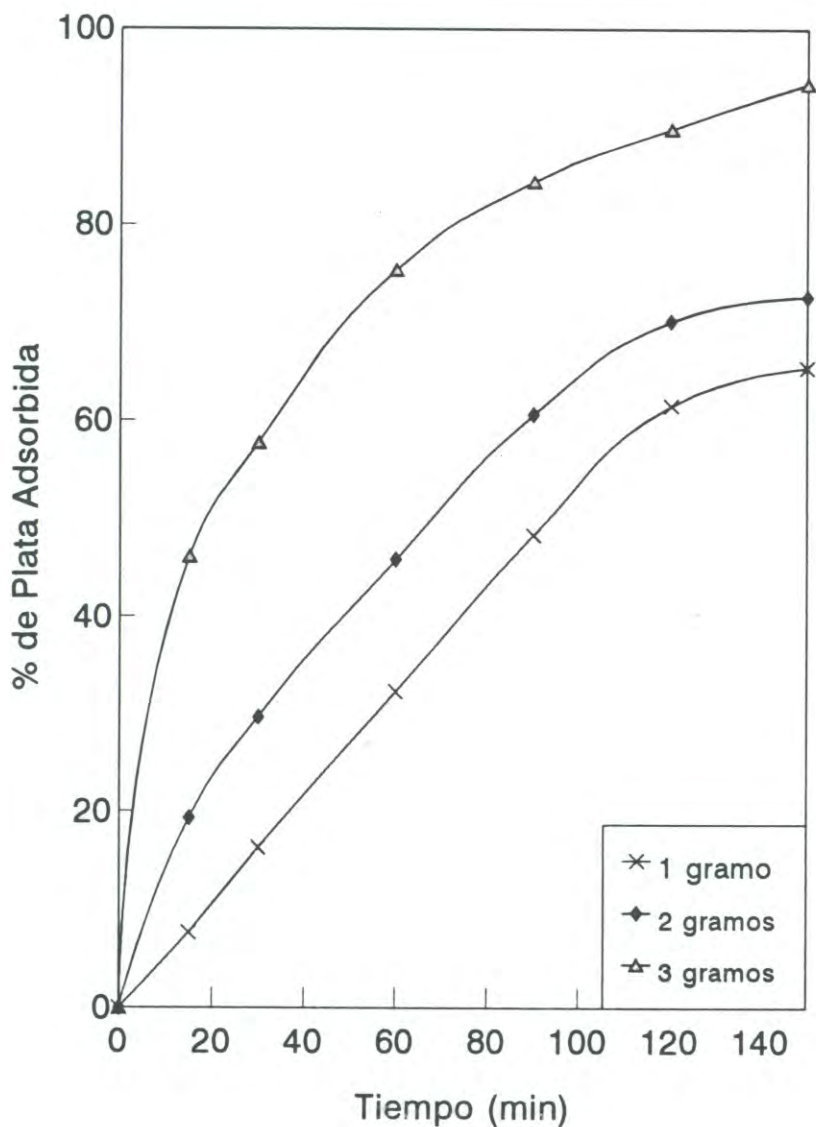


Figura 6. Efecto de la cantidad de carbón activado en la adsorción de plata.
[Ag] = 50 ppm; [CuBr₂] = 0.01 M; [Br⁻] = 1.5 M;
Temperatura = 30 °C y 600 rpm.

4.5. Efecto de la Concentración de Plata.

En el análisis del comportamiento de la adsorción de los complejos bromo-plata en el carbón activado de acuerdo a la concentración de plata en solución se realizó para los valores 20, 50, 60, 80 y 100 rpm.

Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica de la Figura 7, donde se observa que para altas concentraciones de plata, existe una mayor cantidad adsorbida del complejo bromo-plata, no así para bajas concentraciones, lo cual está de acuerdo con la isoterma de Langmuir, a menor C^* , menor C^{ads} .

También se observó que a bajas concentraciones de plata en solución la velocidad de adsorción aumenta debido a que existe una mayor disposición de área superficial en el carbón activado, de acuerdo a lo reportado por Fleming et al^[27] y Ladeira et al^[22], quienes observaron que para soluciones diluidas, el proceso de adsorción no se ve influenciado por la concentración de oro en solución.

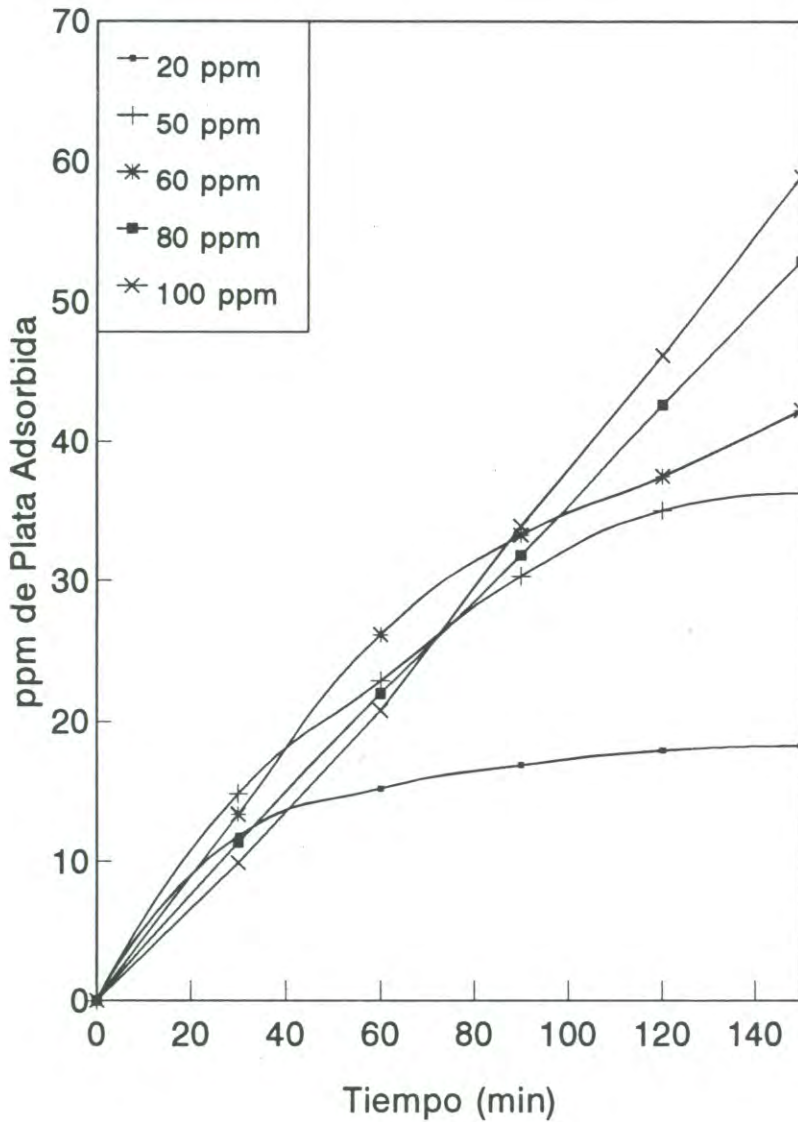


Figura 7. Efecto de la concentración de plata en la adsorción.
 [CuBr₂] = 0.01 M; [Br⁻] = 1.5 M; 2 gramos de carbón activado;
 T = 30 °C y 600 rpm.

4.6. Efecto de la Concentración de los Iones Cúpricos

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8. Los datos experimentales muestran un comportamiento descendente en la adsorción de la plata al aumentar la concentración de iones cúpricos. Este comportamiento probablemente se debe a la competencia por los mismos sitios de adsorción entre los componentes aniónicos del cúprico y de la plata. A mayor concentraciones de cúprico, este desplaza de la superficie los complejos de plata. A bajas concentraciones de iones cúpricos existen una mayor velocidad de adsorción, la cual se ve favorecida al aumentar la temperatura, como se puede observar en la Figura 9.

Sin embargo a altas concentraciones de bromuro cúprico, 0.5 M, después de los 50 °C se presenta una disminución en la capacidad de adsorción, lo cual se asocia a una competencia de especies por el bromuro cúprico, hacia los sitios activos de la superficie. También podría suponerse una descomposición de los reactivos debida a la temperatura y esta pueda provocar una oxidación en la superficie del carbón y provocar la inhibición de los sitios activos en la superficie del carbón activado, tal como se observa en la Figura 10.

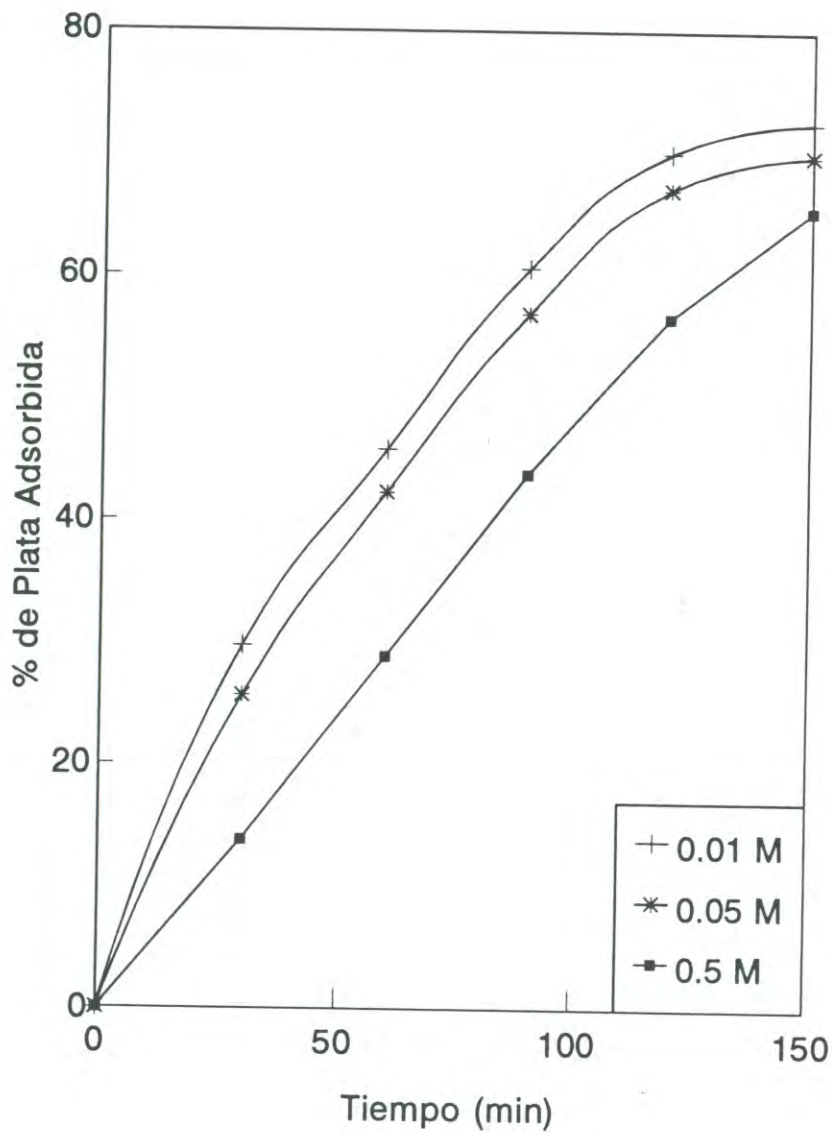


Figura 8. Efecto de la concentración de iones cúprico en la adsorción de plata. [Ag] = 50 ppm; [Br⁻] = 1.5 M; 2 gramos de carbón activado; T = 30 °C y 600 rpm.

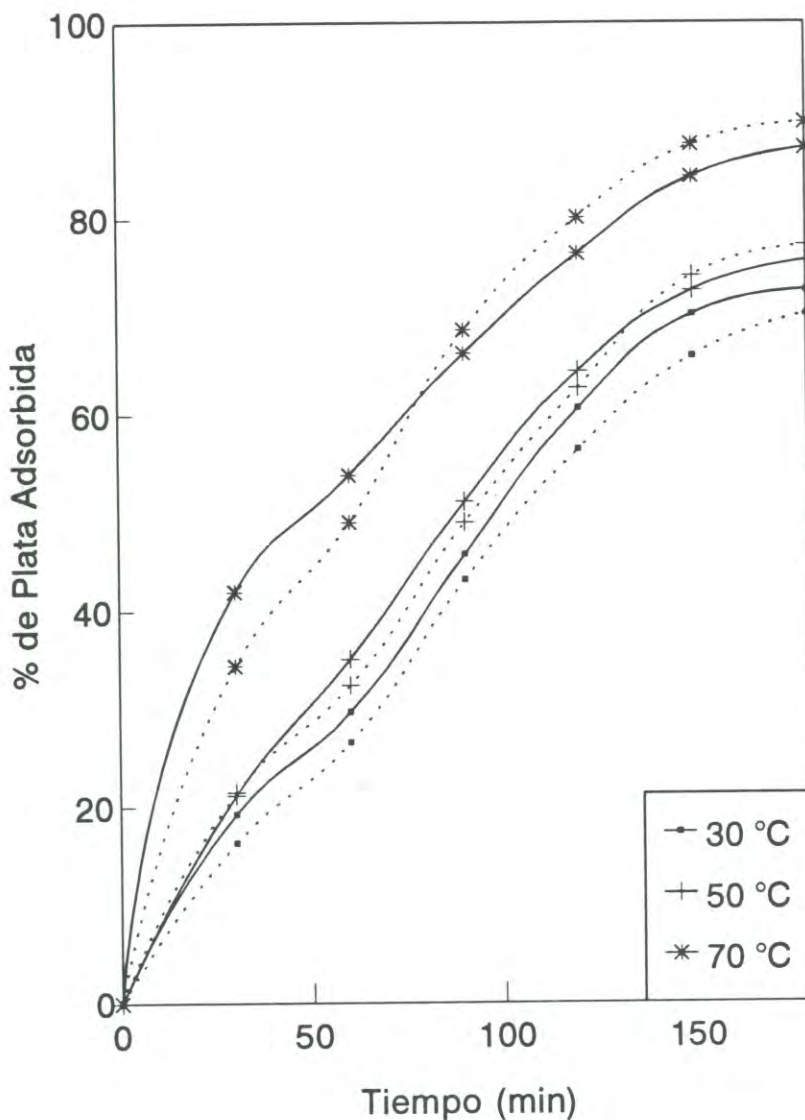


Figura 9. Efecto de la concentración de bromuro cúprico con respecto a la temperatura. $[Ag] = 50$ ppm; $[Br^-] = 1.5$ M; 2 gramos de carbón activado; 600 rpm; $[CuBr_2] = 0.01$ M. Línea punteada $[CuBr_2] = 0.05$ M. Línea continua

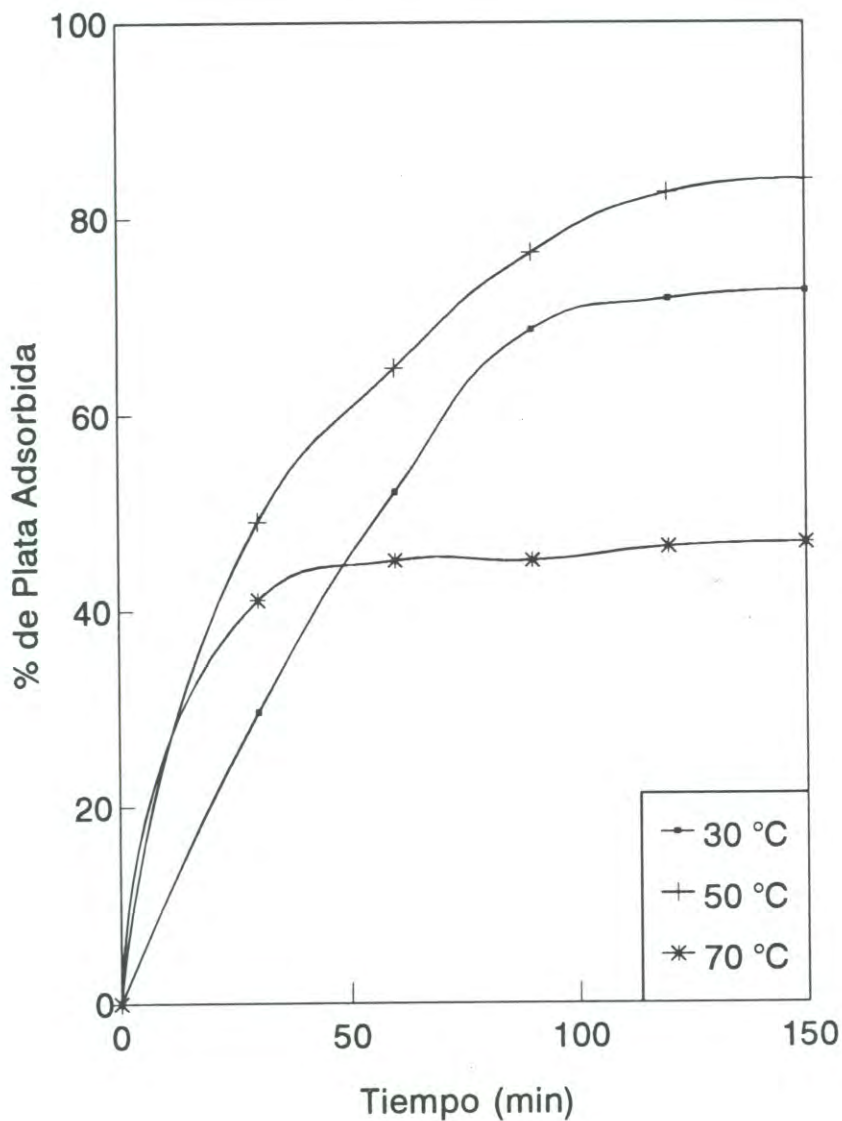


Figura 10. Efecto de la temperatura a alta concentración de bromuro cúprico. $[Ag] = 50$ ppm; $[CuBr_2] = 0.5$ M; $[Br^-] = 1.5$ M; 2 gramos de carbón activado y 600 rpm.

4.7. Efecto de la Temperatura.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 11, en la cual se aprecia que la velocidad y capacidad de adsorción de los complejos bromo-plata, aumenta al incrementarse la temperatura. Se presentan dos regiones bien definidas una para el rango de temperatura de 30 a 50 °C, y otra para 60 a 80 °C, En las cuales se puede apreciar que no existe un cambio significativo en la adsorción de los complejos bromo-plata en el carbón activado. Sin embargo se puede ver que si existe un efecto significativo en el rango de temperatura de 50 a 60 °C donde el porcentaje de adsorción se eleva de un 60 a 80 %.

También pudo observarse que la cinética de adsorción aumenta con respecto a la temperatura en los primeros 40 minutos.

Cabe mencionar que para esta prueba experimental se utilizó bajas concentraciones de iones cúpricos, del orden de 0.01 M. Después se realizaron pruebas experimentales, como se puede observar en la Figura 8 donde se hace una comparación del efecto de la temperatura a diferentes concentraciones, estableciendo así, que existen cambios poco significativos en la velocidad de adsorción cuando se trabaja en un rango de concentración de iones cúpricos de 0.01 y 0.05 M y temperaturas en un rango de 30 a 70 °C.

Por otra parte se analizó el efecto de la temperatura para una alta concentración de iones cúprico, 0.5 M. El resultado obtenido (Figura 10) mostró que la temperatura afecta considerablemente a la adsorción de plata en el carbón activado, ya que esta disminuye repentinamente cuando la temperatura se encuentra arriba de 50 °C. Esta tendencia de la velocidad de adsorción es la misma que observaron Muir^[21] y Ladeira et al^[22], para la adsorción de complejos bromo-oro en carbón activado a partir de soluciones de cianuro. Ellos explicaron este

comportamiento como una oxidación de la superficie del carbón, observado mediante espectrofotometría, lo cual produce un efecto negativo en el proceso de adsorción.

En relación al presente trabajo se podría suponer que, además puede haber competencia de iones o de complejos formados por el exceso de iones cúpricos en la solución, los cuales podrían ocupar mayor cantidad de sitios activos el descenso repentino observado en la Figura 6 puede ser causado por la oxidación superficial del carbón igual a la observada por Muir et al^[21] y Ladeira et al^[22]. Esto solo se presenta combinando las condiciones de alta temperatura y elevado potencial de oxidación en la solución.

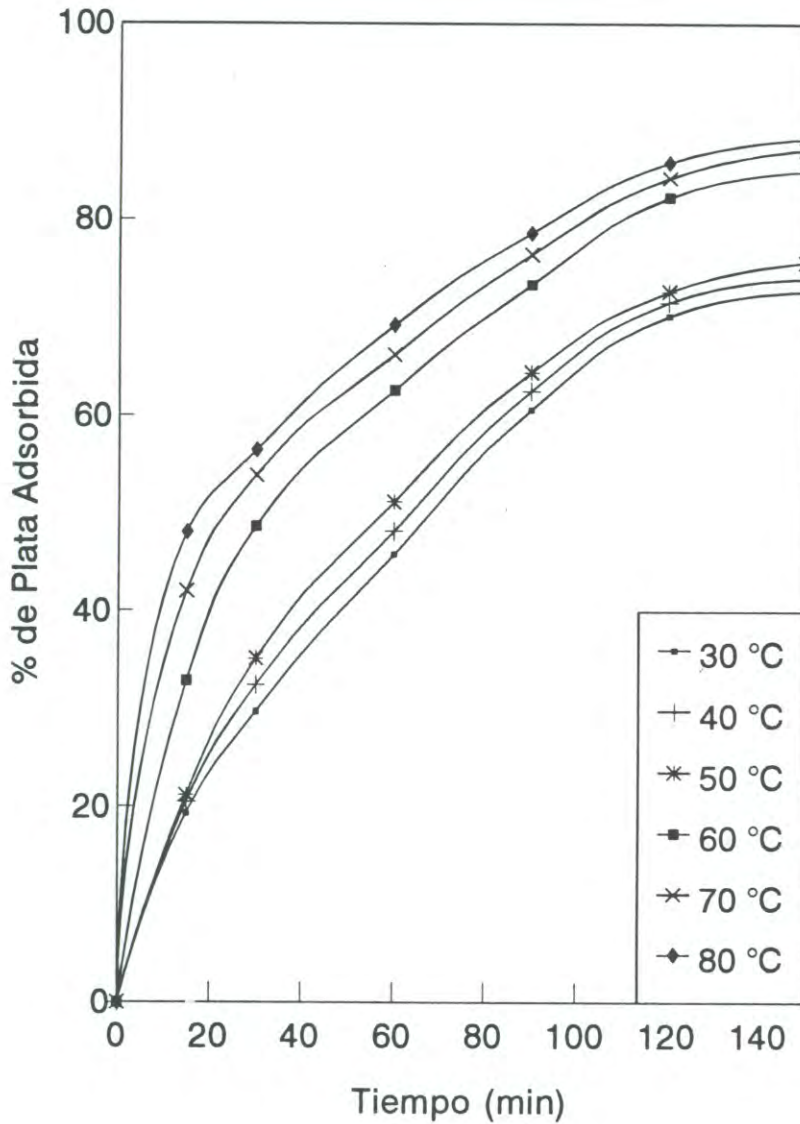


Figura 11. Efecto de la temperatura en la adsorción de plata. $[Ag] = 50$ ppm; $[Br] = 1.5$ M; 2 gramos de carbón activado y 600 rpm.

4.8. Efecto de la Concentración de los Iones Bromuro

Para la evaluación de este parámetro se realizaron distintas corridas, variando la concentración de iones bromuro y manteniendo constantes el resto de los parámetros.

La finalidad de estas pruebas es observar el comportamiento de la adsorción de los complejos de plata-bromo en el carbón activado, para lo cual se realizaron variación en la concentración de iones bromuro en los siguientes rangos: 1.5, 1.75 y 2 M.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 12. Se puede apreciar que existe una disminución en la adsorción cuando se incrementa los iones bromuro en solución, debido a un efecto competitivo de los complejos bromo-plata con el bromo o a la oxidación en su caso de la superficie de carbón. Ese comportamiento está de acuerdo con Mensah et al ^[20], indicando que la capacidad de carga se inhibe debido a la presencia de una concentración excesiva de iones bromo en solución.

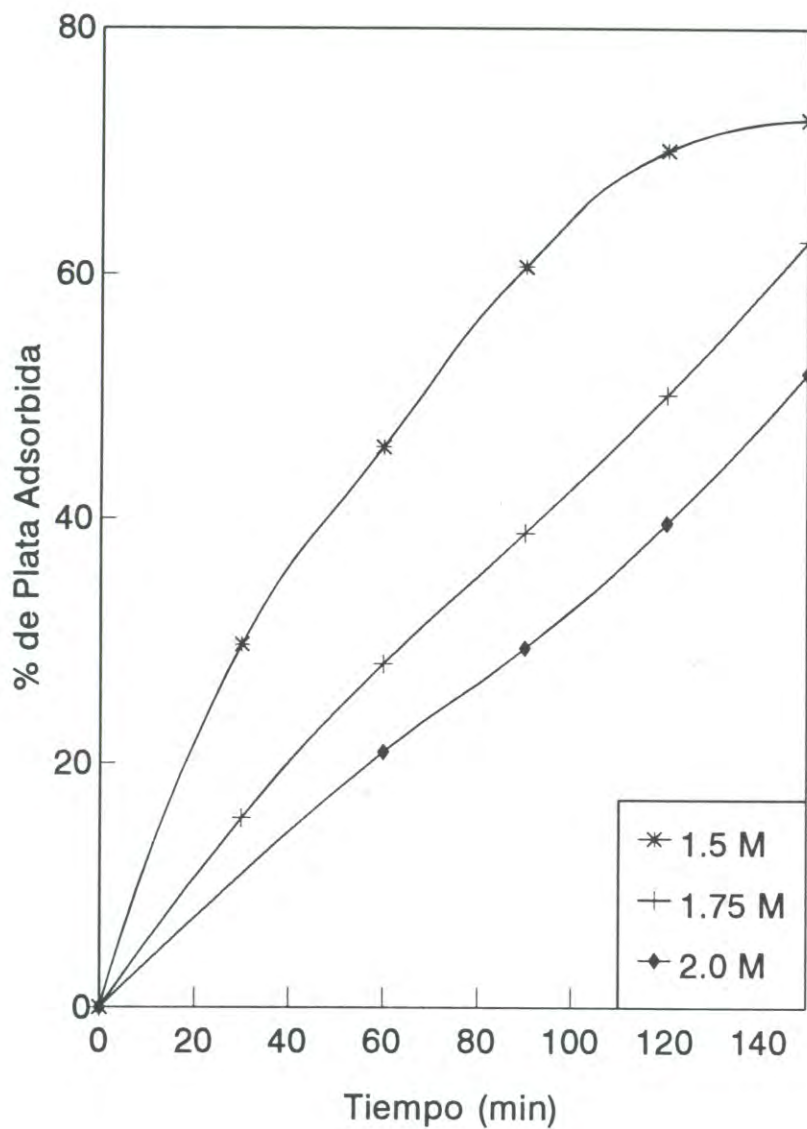


Figura 12. Efecto de la concentración de iones bromuro en la adsorción de plata.
[Ag] = 50 ppm; [CuBr₂] = 0.01 M; 2 gramos de carbón activado;
T = 30 °C y 600 rpm.

V. CONCLUSIONES

- Solo es necesario mantener las partículas en suspensión, minimizando el asentamiento en el fondo del reactor, para reducir al máximo la resistencia por transferencia de masa.
- Para bajas concentraciones de bromuro cúprico, 0.01 M, se obtienen una mayor velocidad de adsorción de plata en el carbón activado.
- La capacidad de adsorción disminuye, al aumentar la concentración de iones bromuro en la solución.
- La cantidad del complejo bromo-plata adsorbida es directamente proporcional a la temperatura, a bajas concentraciones de iones cúprico, en un rango de 0.01 M a 0.05 M.
- La cantidad de plata recuperada es directamente proporcional al aumento de la cantidad de carbón activado.
- La alta temperatura, arriba de 50 °C, y la alta concentración de iones cúprico, 0.5 M, provocan un efecto negativo en adsorción del complejo bromo-plata. Probablemente debido a la oxidación superficial del carbón.
- El sistema de adsorción de plata en soluciones de bromo-plata, utilizando carbón activado tiene una cinética más rápida en comparación de los sistemas ya mencionados, alcanzando el equilibrio en 3 horas aproximadamente, mientras que los otros alcanzan el equilibrio en un rango de tiempo de 7 a 12 horas aproximadamente.

VI. BIBLIOGRAFIA

- 1.- A. Dadgar: " Extraction of gold and silver from refractory concentrates by bromine process". Precious Metals '89. Edited by M.C. Jha and S.D. Hill. The Minerals, Metals and Materials Society, 1988. pp. 227-240
- 2.- C.A. Shaeffer:"Process of Extracting Gold and Silver From Their Ores". U.S. Patent No. 267,723. 1882
- 3.- C.G. Fink and G.L. Putnam:" Bromine Process For Gold Ores" U.S. Patent No. 2,283,198. 1942
- 4.- R.H. Sergent: " The Use of Brominated Hydantoins for Gold Leaching". Randol Gold Forum 88, Scottsdale, Az, 1988. pp. 167-171
- 5.- C.G. Pesic and R.H. Sergent: " The Rotating Disc Study of Gold Dissolution With Geobrom". EPD Congress 1990, Edited By D.R. Gaskell. The Minerals, Metals and Materials Society, 1990. pp. 355-391
- 6.- M. Yanez: " Lixiviación de Oro con Soluciones de Bromuro Cúprico y Bromuro de Sodio". Tesis, Universidad de Sonora, 1995.
- 7.- F. Rincon y G. Lapidus: " Lixiviación de plata en el sistema Bromato-Bromuro". Avances en Ingeniería Química, 1991. pp. 171-175
- 8.- G. Martínez: "Estudio Cinético de la Lixiviación de la Plata con Bromuro Cúprico". Tesis, Universidad de Sonora, 1994.

- 9.- J. Gross and J.W. Scott: " Precipitation of Gold and Silver From Cyanide Solution on Charcoal". Technical paper 378, U.S. Bureau of Mines, Washington. D.C. (1927)
- 10.- W.P. Davis: " Use of Carbon for the Precipitation of Gold From Solution and Subsequent Burning". U.S. Patent No. 227,963 (1880)
- 11.- R.J. Adamson:" Gold Metallurgical in South Africa". Chambers of Mines of South Africa. Johannesburg (1972). pp. 88
- 12.- W.D. Johnson: " Abstraction of Gold and Silver From Their Solutions in Potassium Cyanide". U.S. Par. 522,260, July, 1984.
- 13.- J.B. Zadra: " A Process For The Recovery of Gold From Activated Carbon by Leaching and Electrolysis." U.S. Bureau of Mines , R.I. No. 4672, Washington D.C., 1950, p, 47
- 14.- H.L. Hind and L. Trautman: " Metallurgical Practice at Homestakes Lead Operation". Homestake Mining Company Lead, South Africa.
- 15.- J.C. Mattson and H.B. Mark:" Activate Carbon ". Marcel Dekker, New York, 1971.
- 16.- G. J. McDougall and R.D. Hancock: " Activated Carbon-Gold a Literature Survey". Minerals Sci. Engng. Vol. 12, No. 2, April 1980, pp. 85-99
- 17.- M. Smisek and S. Cerny: " Active Carbon; Manufacture, Properties and Applications". Elsevier Publishing Company, 1970, pp. 49-70

- 18.- B. Pesice and V. C. Storhok: " Adsorption of Gold on Activated Carbón in Bromide Solution". Metallurgical Transaction Volume 23B, October 1992, pp. 557-566
- 19.- B. Pesice, B. D. Smith and R. H. Sergent: " Dissolution of Gold With Bromide From Refractory Ores Preoxidized by Pressure Oxidation". EPD Congress 1992. Edited by J.P. Hager. The Minerals, Metals and Materials Society, 1991.
- 20.- R.k. Miensah -Biney, K.J. Reid and M.T. Hepworth: "Loading Characteristics of Gold-Bromo Species Onto Activated Carbon ". Minerals and Metallurgical Processing. February, 1993. pp. 13-19
- 21.- D.M. Muir: " Recovery of Gold from Cyanide Solutions Using Activate Carbón: a Review". Notas del Curso de Concentración y Purificación Acuosa. Universidad de Sonora, 1994.
- 22.- A.C.Q. Ladeira, M.E.M. Figueira y V.S.T. Ciminelli: " Characterization of Activated Carbons Utilized in the Gold Industry: Physical and Chemical Properties, and Kinetic Study". Minerals Engineering, Vol. 6. No. 6. 1993. pp. 585-596.
- 23.- R.Y. Waan y M.L. Vier: " Research and Development Activities for the Recovery of Gold From Noncyanide Solutions". Hidrometallurgy. Fundamentals, Technology and Innovation. Edited by J.B. Hiskey, SME. 1993. pp. 415-436.
- 24.- L.A. Almazán : " Adsorción de Plata en Carbón Activado a Partir de Soluciones Acidas de Tiourea". Tesis. Universidad de Sonora, 1991.

- 25.- T.M. Sun y W.T. Yen: " Kinetics of Gold Chloride Adsorption onto Activated Carbon". Minerals Engineering, Vol. 6. No. 1. 1993, pp. 17-29.
- 26.- J.M. Smith: " Ingeniería de la cinética Química". Editorial CECSA. Primera edición en español. 1966.
- 27.- C.A. Fleming: The Adsorption of Gold Cyanide onto Activated Carbon III." Factors Influencing the Rate of Loading and Equilibrium Capacity. J. of South African Institute of Mining and Metallurgy, 1984.
- 28.- C.A. Fleming: " The Recovery of Gold From Thiourea Leach Liquors With Activated Carbon," Proceedings of International Symposium on Gold Metallurgy, R.S. Salter et al., Eds., CIM, Canada, August, pp 259-277.
- 29.- Butler: " Ionic Equilibrium". A Mathematical Approach, 1964.

VII. INVESTIGACION FUTURA

INVESTIGACION FUTURA

- **Evaluación de la variación del radio de partícula.**
- **Evaluación del efecto del pH.**
- **Estudio micrográfico de la superficie del carbón**
- **Elaborar un modelo cinético con base a los fenómenos observados**

APENDICE
(TABLAS DE RESULTADOS)

TABLA I Datos experimentales de la Figura 2. Isoterma de Langmuir linealizada.

CONDICIONES EXPERIMENTALES

Temperatura = 30 °C

[Ag] = 50 ppm

[Br⁻] = 1.5 M

C*	C*/C _{ads} Concentración de plata, ppm.				
	20	40	60	80	100
0.97	0.51				
2.93		0.62			
15.58			3.51		
23.03				4.04	
39.99					6.66
C*	Concentración de carbón				
	1 gr	2 gr	3 gr		
11.0	1.41				
8.79		2.13			
2.0			0.625		

TABLA II. Datos de la Figura 3. Diagrama de distribución de especies del sistema bromo-plata.

CONDICIONES EXPERIMENTALES:

[Br⁻] = 1.5 M

Temperatura = 25 °C

Log[Br ⁻]	Especies en Solución			
	AgBr	AgBr ₂ ⁻	AgBr ₃ ⁻²	AgBr ₄ ⁻³
0.0	0.000101	0.04112	0.471834	0.486946
0.020412	7.98E-05	0.035774	0.451542	0.512604
0.041393	6.43E-05	0.031423	0.432674	0.535839
0.079181	5.23E-05	0.027831	0.415144	0.556973
0.113943	4.35E-05	0.02828	0.398852	0.576277
0.146126	3.65E-05	0.022293	0.383695	0.593976
0.176091	3.09E-05	0.02013	0.369577	0.610262
0.230449	2.64E-05	0.010271	0.350408	0.625296
0.255273	2.27E-05	0.01666	0.3441	0.639217
0.278754	1.97E-05	0.015255	0.332582	0.652144
0.30103	1.72E-05	0.014022	0.321783	0.664178

TABLA III. Datos de la figura 4. Diagrama de distribución de especies del sistema bromo-cuprico.

CONDICIONES EXPERIMENTALES:

$[\text{Br}^-] = 1.5 \text{ M}$

Temperatura = 25 °C

Log[Br ⁻]	Especies en Solución				
	CuBr ⁺	CuBr ₂	CuBr ₃ ⁻	CuBr ₄ ⁻²	CuBr ₅₋₃
0	6.89E-5	0.0287	0.329826	0.455287	0.1854
0.0414	5.26E-5	0.0241	0.304846	0.462886	0.2074
0.08	4.1E-5	0.0204	0.282376	0.467746	0.2286
0.114	3.2E-5	0.0175	0.262145	0.470419	0.2491
0.146	2.6E-5	0.0151	0.243899	0.471344	0.2688
0.176	2.1E-5	0.0132	0.22741	0.470871	0.2877
0.2041	1.73E-5	0.0156	0.212477	0.46928	0.3058
0.23041	1.44E-5	0.0102	0.19892	0.466797	0.3232
0.25527	1.2E-5	0.0090	0.186584	0.463605	0.3399
0.27875	1.01E-5	0.0080	0.175333	0.459851	0.3559
0.30103	8.6E-6	0.0071	0.165047	0.455657	0.3712

TABLA IV. Datos experimentales de la Figura 5. Efecto de la velocidad de agitación, en la adsorción de plata, expresado en porcentaje de adsorción.

CONDICIONES EXPERIMENTALES

[Ag] = 50 ppm

[Br⁻¹] = 1.5 M

[CuBr₂] = 0.01 M

Carbón activado = 2 g

Temperatura = 300 °C

TIEMPO (min)	VELOCIDAD DE AGITACION, (rpm)			
	400	600	800	1000
0	0	0	0	0
30	26	29.7	33.2	35.4
60	41.2	45.8	48.6	50.1
90	52.5	60.6	62.5	64.4
120	59.3	70.1	72.1	73.6
150	65.3	72.6	74.8	76.4

TABLA V. Datos experimentales de la figura 6. Efecto de la cantidad de carbón activado en la adsorción de plata, expresada en porcentaje de recuperación.

CONDICIONES EXPERIMENTALES:

[Ag] = 50 ppm

[Br⁻¹] = 1.5 M

[CuBr₂] = 0.5 M

Temperatura = 30 °C

Velocidad de agitación = 600 rpm

TIEMPO (min)	CARBON ACTIVADO, (g)		
	1	2	3
0	0	0	0
15	7.7	19.3	46.1
30	16.3	29.7	55.7
60	32.3	45.8	75.4
90	48.3	60.6	84.4
120	64.4	70.1	89.8
150	65.4	72.6	94.4

TABLA VI. Datos experimentales de la Figura 7. Efecto de la concentración de plata en la adsorción de plata, expresada en partes por millón.

CONDICIONES EXPERIMENTALES:

$[\text{Br}^{-1}] = 1.5 \text{ M}$

$[\text{CuBr}_2] = 0.05 \text{ M}$

Temperatura = 30 °C

Carbón activado = 2 g

Velocidad de agitación = 600 rpm

TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE PLATA, (ppm)				
	20	50	60	80	100
0	0	0	0	0	0
30	11.825	14.85	13.38	11.36	9.9
60	15.22	22.9	26.16	22.00	20.8
90	16.88	30.3	33.26	31.84	33.9
120	17.94	35.05	37.5	42.64	46.2
150	18.26	36.3	42.24	52.88	58.9

TABLA VII.

Datos experimentales de la Figura 8. Efecto de la concentración de iones cúprico en la adsorción de plata, expresada en porcentaje de recuperación.

CONDICIONES EXPERIMENTALES:

[Ag] = 50 ppm

[Br⁻¹] = 1.5 M

Temperatura = 30 °C

Carbón activado = 2 g

Velocidad de agitación = 600 rpm

TIEMPO (min)	CONCENTRACION, (M)		
	0.01	0.05	0.5
0	0	0	0
30	29.7	25.6	13.8
60	45.8	42.3	28.8
90	60.6	56.9	43.8
120	70.1	67.1	56.6
150	72.6	69.6	65.4

TABLA VIII. Datos experimentales de la Figura 9. Efecto de la concentración de iones cúpricos a bajas concentraciones de bromuro cúprico.

CONDICIONES EXPERIMENTALES:

[Ag] = 50 ppm

[Br⁻] = 1.5 M

[CuBr₂] = 0.01 M

Carbón Activado = 2 gramos

Velocidad de Agitación = 600 rpm

Tiempo (min)	Temperatura, (°C)					
	30	50	70	80	50	70
0	0	0	0	0	0	0
15	19.3	21.2	42	16.4	21.50	34.4
30	29.7	35.1	53.9	26.6	32.4	49.1
60	45.8	51.2	66.2	43.2	49.10	80.1
90	60.6	64.4	76.4	65.9	74.11	87.6
120	70.1	72.6	84.3	70.2	77.20	89.8
150	72.6	75.6	87.2	70.2	76.27	89.8

TABLA IX. Datos experimentales de la Figura 10. Efecto de la temperatura en la adsorción de plata, expresada en porcentaje de recuperación.

CONDICIONES EXPERIMENTALES:

[Ag] = 50 ppm

[Br⁻¹] = 1.5 M

[CuBr₂] = 0.05 M

Carbón activado = 2 g

Velocidad de agitación = 600 rpm

TIEMPO (min)	TEMPERATURA, °C					
	30	40	50	60	70	80
0	0	0	0	0	0	0
15	19.3	21.5	21.2	32.8	42.0	48.1
30	29.7	32.4	35.1	48.7	53.9	56.5
60	45.8	48.2	51.2	62.6	66.4	69.2
90	60.6	62.5	64.4	73.3	76.4	78.6
120	70.1	71.5	72.6	82.3	84.3	85.9
150	72.6	73.9	75.6	85.0	87.2	88.3

TABLA X. Datos experimentales de la Figura 11. Efecto de la concentración de iones cúpricos en la adsorción de plata, expresada en porcentaje de recuperación.

CONDICIONES EXPERIMENTALES:

[Ag] = 50 ppm

[Br⁻] = 1.5 M

[CuBr₂] = 0.5 M

Velocidad de agitación = 600 rpm

Carbón activado = 2 g

Temperatura = 30 °C

Tiempo (min)	Temperatura, (°C)		
	30	50	70
0	0	0	0
30	29.7	49.1	41.1
60	52.1	64.8	45.1
90	68.7	76.5	45.1
120	71.8	82.6	46.5
150	72.6	83.9	46.9

TABLA XI. Datos experimentales de la Figura 12. Efecto de la concentración de iones bromuro en la adsorción de plata, expresada en porcentaje de recuperación.

CONDICIONES EXPERIMENTALES:

[Ag] = 50 ppm

[CuBr₂] = 0.01 M

Temperatura = 30 °C

Carbón activado = 2 g

Velocidad de agitación = 600 rpm.

TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE BROMURO, (M)		
	1.5	1.75	2.0
0	0	0	0
30	29.7	15.5	---
60	45.8	28.1	20.9
90	60.6	38.8	29.4
120	70.1	50.1	39.6
150	72.6	62.7	51.9