



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERIA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA**

**Estudio de la adsorción de carbón activado
de soluciones con oro y plata provenientes
de una lixiviación ecológica con DEZO**

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO METALURGICO

Presenta

Antonio Miguel Ruiz Mungaray

Hermosillo, Sonora

Diciembre 2023

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



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



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

Votos aprobatorios del Jurado

UNIVERSIDAD DE SONORA

VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora, a 04 de diciembre de 2023.

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

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para revisar la Tesis Profesional “ESTUDIO DE LA ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO DE SOLUCIONES CON ORO Y PLATA PROVENIENTES DE UNA LIXIVIACIÓN ECOLÓGICA CON DEZO”, presentada por:

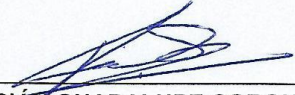
ANTONIO MIGUEL RUÍZ MUNGARAY

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

INGENIERO METALÚRGICO

04/12/2023

Fecha


M.C. **FABIÁN GUADALUPE CORONADO DE LA CRUZ**

04/12/2023


DR. **JESÚS HUMBERTO CORONADO LÓPEZ**

04/12/2023


DR. **ALEJANDRO VALENZUELA SOTO**

04/12/2023


DR. **VÍCTOR MANUEL VÁZQUEZ VÁZQUEZ**

DEDICATORIA

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mis padres ya que siempre estuvieron apoyándome y dándome los mejores consejos, los cuales fueron de gran ayuda y motivación para poder culminar con gran satisfacción este bonito proyecto.

Me han enseñado a ser la persona que soy hoy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi empeño. Todo esto con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por permitirme llegar a esta etapa de mi vida, por darme las habilidades y conocimientos necesarios para concluir esta tesis, por darme el apoyo de mi familia, y enseñarme que todo lo que he logrado ha sido gracias a Él, por no dejarme dar por vencido cuando creía que las cosas se ponían difíciles.

A mi tutor Dr. Fabián Guadalupe Coronado de la Cruz. Sin usted y sus conocimientos, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy he logrado. Usted formó parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento, cuando más las necesite; por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían confusas. Gracias por sus orientaciones.

Al Dr. Guillermo del Carmen Tiburcio Munive, sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a usted mi profesor querido, les debo mis conocimientos. Donde quiera que vaya, los llevaré conmigo en mí transitar profesional. Su semilla de conocimientos, germinó en el alma y el espíritu. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.

A mis padres, ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro amados padres, como una meta más conquistada. Orgulloso de haberlos elegido como mis padres.

Gracias por ser quienes son y por creer en mí.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I	1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 Metalurgia del Oro	1
1.2 Propiedades Químicas del Oro	2
1.3 Lixiviación con Cianuro de Sodio.....	4
1.4 Uso del DEZO en minerales de oro	5
1.4.1 Ventajas del Dezo.....	7
1.4.2 Reacciones del Dezo.....	7
1.5 Carbón Activado	8
1.5.1 Recuperación del oro utilizando carbón activado	8
1.6 OBJETIVO GENERAL	9
1.6.1 Objetivos Específicos.....	9
CAPITULO II	10
ANTECEDENTES	10
2.1 Agentes Lixiviantes Ecológicos.....	10
2.1.1 Lixiviación con Cloro.....	10
2.1.2 Lixiviación con Tiosulfato	11
2.2 Propiedades del Carbón Activado.....	11
2.2.1 Adsorción sobre Carbón Activado	12
2.2.2 Mecanismo de Adsorción sobre el Carbón Activado	12
2.2.3 Factores que afectan la Adsorción del Oro	13
2.2.4 Velocidad de Adsorción y Capacidad de Cargado de Oro sobre Carbón Activado	16
2.2.5 Contacto del carbón activado con la solución rica	16
2.3 Isotermas de Adsorción	17
2.3.1 Isotherma de Freundlich	17
2.3.2 Isotherma de Langmuir	18
2.3.3 Desorción y reactivación del carbón	19

2.3.4 Planta ADR	20
CAPITULO III	22
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	22
3.1 Equipo y reactivos a utilizar	22
3.1.1 Equipo	22
3.1.2 Reactivos.....	23
3.2 Procedimiento experimental	23
3.3 Limpieza y Activación del Carbón	24
3.4 Pruebas de Saturación	25
3.5 Análisis Químico del Carbón Cargado	26
3.6 Cinética de Adsorción	28
CAPITULO IV	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1 Análisis químico de las soluciones	30
4.2 Caracterización del carbón activado de 6x10 utilizado en la investigación.....	30
4.2.1 Morfología del carbón activado de 6x10 utilizado en la investigación	31
4.3 Caracterización del Reactivo Dezo	38
4.4 Pruebas de Saturación	39
4.5 Pruebas de adsorción utilizando el modelo de Langmuir y Freundlich	44
4.5.1 Prueba de Saturación Agitada con NaCN	44
4.5.2 Prueba de Saturación Agitada con NaCNO a una concentración de 100 ppm46	
4.5.3 Prueba de Saturación Agitada con NaCNO a una concentración de 300 ppm48	
4.5.4 Prueba de Saturación Agitada con carbón activado con NaCN con una concentración de 100 ppm y solución lixiviada de Au con NaCNO	50
4.6 Balances de columnas.....	52
CAPITULO V	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1 Conclusiones.....	54
5.2 Recomendaciones.....	56
BIBLIOGRAFIA.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Pourbaix para el sistema Au-H ₂ O a 250°C (todas las especies de oro a concentraciones de 10 ⁻⁴ M)	3
Figura 2. Formula estructural de Dezo.	6
Figura 3. Exportación del Dezo.....	6
Figura 4. Metodología para una lixiviación de oro y plata y su recuperación por carbón activado.....	9
Figura 5. Cinética de adsorción del oro	14
Figura 6. Isoterma de Freundlich	16
Figura 7. Diagrama de Flujo de Metodología del uso del Carbón.....	22
Figura 8. Carbón Activado utilizado para las pruebas de saturación y adsorción de las soluciones de oro con Dezo.....	23
Figura 9. a) Carbón seco, b) Se le agrega agua para lavar y remover finos del carbón, c) Carbón ya limpio con agua cristalina.....	24
Figura 10. Carbón activado limpio sin finos	25
Figura 11. a) 1 gramo de carbón activado con solución rica, b) Alícuotas sacadas a determinado tiempo para su lectura en el equipo de A:A	26
Figura 12. a) Gramo de carbón activado cargado en crisol, b) Muestras en la mufla a 800°C, c) Carbón Activado cargado fundiéndose, d) Carbón activado llevado a ceniza..	27
Figura 13 a) Ceniza del carbón activado cargado llevado a digestión ácida, b) Solución proveniente de la digestión ácida lista para su lectura en el equipo de Absorción Atómica.....	28
Figura 14. a) Sistema de columnas de carbón activado, b) Alícuotas tomadas a intervalos de tiempo para su lectura en el equipo de EAA.....	29
Figura 15. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10.....	31
Figura 16. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10 listo para la adsorción del oro.....	32
Figura 17. Análisis elemental por espectroscopía de rayos X por energía dispersiva para el carbón activado original.	33
Figura 18. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10 cargado con oro	34
Figura 19. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10 cargado con oro a 500x.....	35

Figura 20. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10 cargado con oro a 500x.....	35
Figura 21. Análisis elemental por espectroscopía de rayos X por energía dispersiva para el carbón activado cargado con oro.	36
Figura 22. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) del reactivo DEZO.	38
Figura 23. Espectroscopia Raman del reactivo Dezo.	38
Figura 24. Grafica de la adsorción de una solución cianurada en carbón activado con NaCN y solución de aurocianuro de 2.65mg/L.	40
Figura 25. Grafica de la adsorción de una solución de Dezo en carbón activado a una concentración de 100 ppm.....	41
Figura 26. Grafica de la adsorción de una solución de Dezo en carbón activado a una concentración de 300 ppm.....	42
Figura 27. Grafica de la adsorción de una solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.	43
Figura 28. Grafica utilizando el modelo de Langmuir de una solución cianurada en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.	44
Figura 29. Grafica utilizando el modelo de Freundlich de una solución cianurada en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.	45
Figura 30. Grafica utilizando el modelo de Langmuir de una solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 100 ppm.	46
Figura 31. Grafica utilizando el modelo de Freundlich de una solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 100 ppm.	47
Figura 32. Grafica utilizando el modelo de Langmuir de una solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 300 ppm.	48
Figura 33. Grafica utilizando el modelo de Freundlich de una solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 300 ppm.	49
Figura 34. Grafica utilizando el modelo de Langmuir de una solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.	50
Figura 35. Grafica utilizando el modelo de Freundlich de una solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.	51
Figura 36. Gráfica de recuperación de Au en mg/día a diferentes flujos de entrada con carbón activado a una concentración de 300 ppm	53
Figura 37. Gráfica de recuperación de Au en mg/día a diferentes flujos de entrada con carbón activado a una concentración de 100 ppm	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Propiedades químicas y físicas del carbón activado	24
Tabla II. Análisis químico de las soluciones	30
Tabla III. Análisis físico químico del carbón activado para las pruebas de adsorción	30
Tabla IV. Composición elemental del carbón original	33
Tabla V. Composición elemental en porcentaje del carbón activado cargado	37
Tabla VI. Prueba de Saturación Agitada con NaCN con una concentración de 100 ppm y un tamaño de carbón de 6x10.	40
Tabla VII. Prueba de Saturación Agitada con NaCNO a una concentración de 100 ppm y un tamaño de carbón de 6x10.	41
Tabla VIII. Prueba de Saturación Agitada con NaCNO con una concentración a 300 ppm y un tamaño de carbón de 6x10.	42
Tabla IX. Prueba de Saturación Agitada con carbón activado con NaCN con una concentración de 100 ppm y solución lixiviada de Au con NaCNO	43
Tabla X. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Langmuir para la solución cianurada en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.	45
Tabla XI. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Freundlich para la solución cianurada en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.	45
Tabla XII. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Langmuir para la solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 100 ppm.	46
Tabla XIII. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Freundlich para la solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 100 ppm.	47
Tabla XIV. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Langmuir para la solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 300 ppm.	48
Tabla XV. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Freundlich para la solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 300 ppm.	49

Tabla XVI. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Langmuir para la solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.....50

Tabla XVII. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Freundlich para la solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.....51

Tabla XVIII. Columnas con 5g de carbón activado a una concentración de 300 ppm a 4 ciclos y una solución de entrada de oro de 0.78 ppm52

Tabla XIX. Columnas con 2g de carbón activado a una concentración de 100 ppm a 4 ciclos y una solución de entrada de oro de 0.78 ppm52

Tabla XX. Columnas con 5g de carbón activado a una concentración de 300 ppm a un solo flujo y una solución de entrada de oro de 0.78 ppm52

Tabla XXI. Columnas con 5g de carbón activado a una concentración de 100 ppm a un solo flujo y una solución de entrada de oro de 0.78 ppm52

RESUMEN

El cianuro de sodio ha sido por muchos años uno de los reactivos más utilizados para la lixiviación de oro y plata en minerales de alta ley, con un manejo fácil y seguro siguiendo los lineamientos de seguridad correspondientes al manejo de este. El problema llega cuando no se usa con los parámetros adecuados y llega a ser un problema para la salud y el ecosistema.

En los últimos años se han realizado investigaciones para la aplicación de nuevos reactivos alternos que sean más amigables con el medio ambiente, pero que también sean más seguros y no presenten riesgos a la salud humana. La investigación del nuevo reactivo Dezo ha presentado buenos resultados en cuanto a la extracción de oro y plata, el problema se presenta en el proceso de recuperación de los metales preciosos de la solución cargada.

Siendo esta la justificación para realizar la investigación sobre el Dezo en carbón activado, ya que no hay suficiente información al respecto, para ello se realizaron pruebas en columnas a nivel laboratorio. Las pruebas consisten en poner en contacto solución rica en oro con Dezo, cambiando ciertos parámetros que afectan la adsorción del oro en carbón activado como lo es la concentración de Dezo con el que fue activado el carbón, flujos de entrada y cantidad de carbón activado en las columnas.

Primeramente, se hicieron pruebas de adsorción agitada sobre el carbón activado, dando buenos resultados de adsorción de acuerdo con las isotermas de Freundlich, posteriormente se hicieron las pruebas de carga en las columnas a nivel laboratorio y respectivamente con su balance, obteniéndose buenos resultados en cuanto a la cantidad de oro adsorbido. Se hicieron comparativas entre diferentes flujos de entrada para observar la velocidad de adsorción de oro en carbón activado, obteniéndose los mejores resultados cuando se maneja un flujo relativamente alto, contrario a lo que se observa en la adsorción en carbón activado al hacer la recuperación de los metales preciosos a partir de soluciones de NaCN, ya que en esas operaciones se utilizan flujos bajos dadas

las reacciones entre el Oro y NaCN, dando como resultado una reacción química que forma aurocianuro, siendo una cinética lenta a comparación a la cinética del Dezo y el oro (Aurocianato).

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Metalurgia del Oro

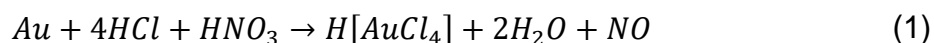
El oro es el metal más noble en la naturaleza, de color amarillo suave, presenta la más alta ductilidad y maleabilidad. Es el único metal que no es atacado en agua o aire ya sea por oxígeno o sulfuro y debido a su durabilidad bajo condiciones altamente corrosivas, ha guiado su amplio uso en la acuñación y joyería a lo largo del tiempo. Se presenta principalmente como metal nativo (estado metálico), siendo los únicos compuestos en la naturaleza las especies telurio ($AuTe_2$) y estibina ($AuSb_2$). [11]

El oro, junto con la plata (Ag) y cobre (Cu), está ubicado dentro de la serie química de los metales de transición, y pertenece al grupo IB de la tabla periódica. Sus principales estados de oxidación son +1 (auroso) y +3 (áurico). El oro es soluble en soluciones de cianuro y agua regia, formando compuestos de coordinación con los iones del agua, por ejemplo $[Au(CN)_2]^-$, $[AuCl_2]^-$ y $[AuCl_4]^-$. [15]

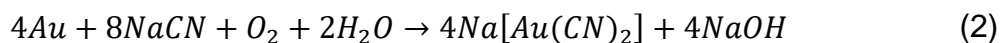
La creciente demanda de oro, hace que su recuperación sea fundamental, aunque el costo de su recuperación debe ser mucho menor al del metal. Debido a su alto valor comercial, el oro no es solamente extraído o recuperado a partir de minerales de mena, este también ha sido recuperado de residuos que contengan oro, como pueden ser residuos electrónicos, partes eléctricas, joyería, materiales ortopédicos, catalizadores usados, entre muchos otros desechos que puedan contener este metal precioso. [10]

1.2 Propiedades Químicas del Oro

El oro puede ser disuelto en ácido clorhídrico en presencia de oxidantes tales como ácido nítrico, oxígeno, iones cúpricos o ferrosos y dióxido de manganeso disuelven el oro. La combinación de ácido nítrico y clorhídrico (agua regia) ataca de manera vigorosa el oro [15], tal y como se muestra en la siguiente reacción (1):



La disolución de oro se lleva a cabo (reacción 1) en soluciones acuosas con la presencia de agentes oxidantes y un ligante para el oro. Dentro de la extracción de oro a partir de sus minerales, la principal reacción de disolución del mismo es también conocida como la reacción de Elsner (2), la cual se lleva a cabo disolviendo el metal en cianuro y teniendo al oxígeno como agente oxidante. [11]



Los compuestos de coordinación de oro, generalmente lo contienen en sus estados de oxidación (I) y (III), aunque también es posible que se presente a los estados (II) y (IV). Entre los compuestos de coordinación de Au (I) se encuentra el aurocianuro $[Au(CN)_2]^-$, el cual es más estable que los complejos de cobre o plata, que comúnmente son encontrados en las soluciones cianuradas derivadas de la extracción de oro, debido a su alta constante de estabilidad (2×10^{38}). Es de notar que otros compuestos de coordinación de interés en la extracción de oro son los iones complejos $[AuCl_2]^-$, $[Au(S_2O_3)_2]^{3-}$, $[Au(NH_2CSNH_2)_2]^+$. El estado III (áurico) es considerado el estado de oxidación más importante, el complejo aurocianuro $[Au(CN)_4]^-$ al igual que su homólogo aurocianuro, es extremadamente estable (1×10^{56}). [15]

Como se observa en la Figura 1 los estados de oxidación predominantes del oro son III (áurico) y I (auroso). No se conoce la existencia de iones áuricos ni aurosos. Los compuestos de oro se unen de forma covalente y la mayoría de las veces en forma de complejos. Los complejos áuricos son fuertes agentes oxidantes.

Parece haber más diferencias que similitudes entre las propiedades de los compuestos análogos de los metales del grupo 1B. En algunos casos, existen similitudes de los complejos de oro con los complejos de sus vecinos horizontales en la tabla periódica. [15]

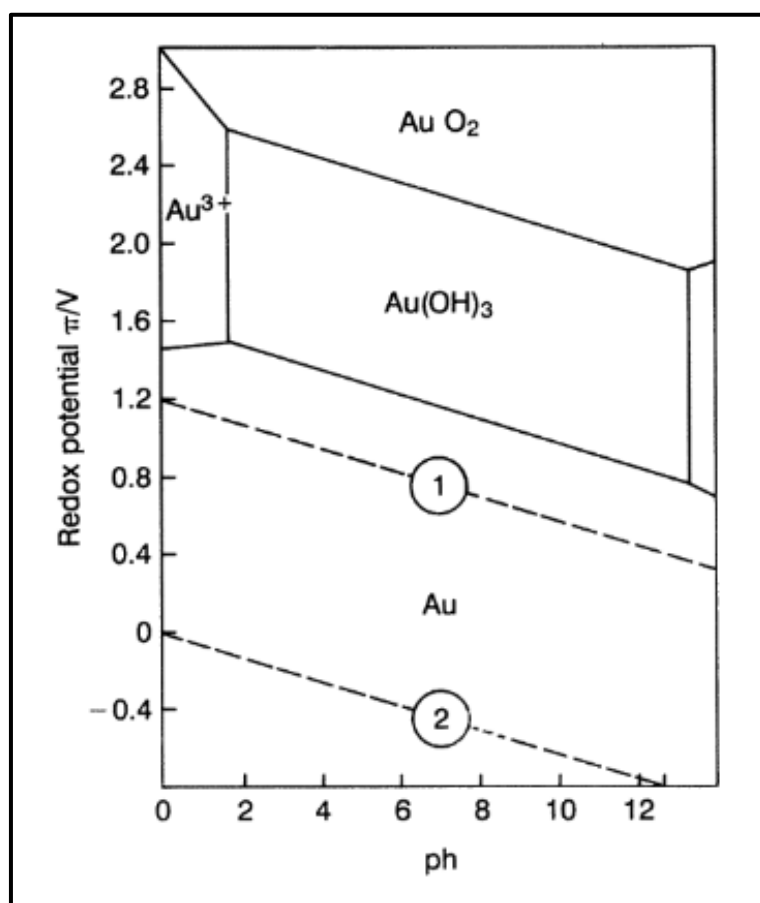
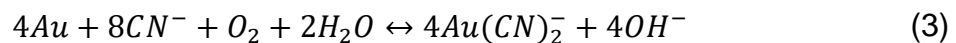


Figura 1. Diagrama de Pourbaix para el sistema Au-H₂O a 250°C (todas las especies de oro a concentraciones de 10⁻⁴ M)

1.3 Lixiviación con Cianuro de Sodio

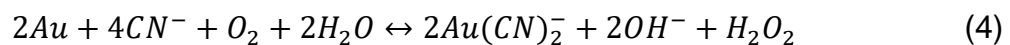
El conocimiento acerca del efecto disolvente de soluciones de cianuro del oro, fue por primera vez descrito por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele en el año de 1783. [5]

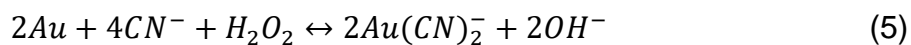
Para 1843, Piotr Romanovich Bagration presenta el primer tratado en la materia. Derivado de su investigación Bagration establece cuatro principios, el primero dicta que la disolución de oro se ve beneficiada cuando el oro es reducido en finas partículas. El segundo, la disolución de oro incrementa con el aumento de la temperatura, el tercero menciona que el oro disuelto en el cianuro precipitará en superficies metálicas en la ausencia de un potencial aplicado. Finalmente, Bagration menciona que la presencia de aire disminuye el tiempo necesario para la disolución. Para 1844, Elsner descubre que la disolución de oro en soluciones de cianuro era debido al oxígeno disuelto y no a la descomposición del agua, estableciendo la fórmula conocida como la “reacción de Elsner” (3). [6]



Sin embargo, no fue sino hasta 1887 que el proceso de cianuración se convertiría en un proceso comercial. La aplicación fue gracias al químico escocés John S. MacArthur en colaboración con los hermanos Forrest, quienes desarrollarían el proceso de cianuración MacArthur-Forrest. Este proceso consiste en, poner en contacto el mineral triturado con una solución diluida de cianuro de sodio, con la finalidad de obtener el oro en solución.

En 1896 Bodlaender descubrió que, al disolver oro en una solución de cianuro aireada, se produciría cantidades significativas de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) durante la reacción, lo cual sugeriría que la formación de peróxido es una reacción en dos etapas.





Dada la suma de las reacciones anteriores (4 y 5), la reacción global corresponde a lo propuesto por Elsner (3). Para 1935 se proporcionaron algunos de los primeros datos termodinámicos y cinéticos fundamentales para la cianuración de oro y plata, confirmando la exactitud de las reacciones propuestas por Elsner y Bodlaender. Asimismo, se determinaron los valores de energía libre de formación del ion aurocianuro $[Au(CN)_2]^-$ y del ion cianuro de plata $[Ag(CN)_2]^-$. Por otro lado, fue investigado el efecto de la concentración de cianuro y pH, con respecto de la velocidad de disolución de oro y plata. Obteniéndose la mayor velocidad de disolución empleando una solución de cianuro de sodio $1 \times 10^2 \frac{mol}{L}$ y, que el proceso era insensible a valores de pH entre 10.5 y 12.5. [1] [11]

1.4 Uso del DEZO en minerales de oro

El Dezo fue sintetizado por primera vez en China, en la ciudad de Jinan, es un reactivo de alta tecnología, que está buscando reemplazar al cianuro de sodio en lixiviación de oro y su uso como fertilizante. Él producto es ecológico y está certificado como químico orgánico, que ha estado siendo ampliamente utilizado en la minería mundial de oro. Además de que las empresas mineras están buscando utilizar la aplicación de productos de baja toxicidad, según el reporte de seguridad JINAN DEZO CHEMICAL CO LTD, Guanli Road, Guanzhuang street, Zhangqiu district, Jinan city, Shandong province, China, www.dezo.hk. El Dezo es una sal de sodio de ácido cianúrico carbonizado, el cual su fórmula molecular es $C_6Na_3O_3H_3N_6$ [3]. Su fórmula estructural se muestra en la Figura 2.

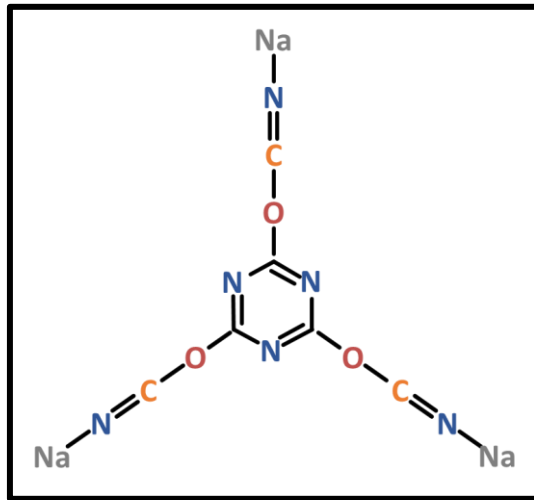


Figura 2. Formula estructural de Dezo.

El Dezo como bien se menciona tiene su sede en la ciudad de Jinan, China, la empresa exporta su producto a varias partes fuera del país como se muestra en la Figura 3. [3]



Figura 3. Exportación del Dezo.

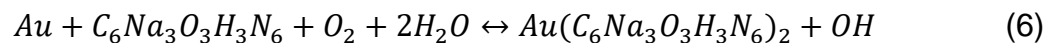
1.4.1 Ventajas del Dezo

- No se requiere estar pendiente del pH (rango de 10.5 a 11), ya que como se conoce el cianuro al tener un descenso de pH, el cianuro se descompone formando ácido cianhídrico volátil, el cual es tóxico y peligroso, el Dezo no forma ácido cianhídrico, por lo cual no representa un riesgo por el descenso del pH de la solución lixivante.
- El producto se maneja igual que con el cianuro de sodio, por lo que las empresas mineras no necesitan modificar los procesos de lixiviación ya establecidos con el cianuro de sodio.
- El reactivo no es volátil, por lo no representa un problema de toxicidad en el aire.
- Una de las ventajas del Dezo, es que tiene un precio muy similar al cianuro de sodio, por lo que en cuanto a temas de costo-producción sale más rentable el uso de Dezo, ya que la empresa se evita el costo de tratamiento de residuos contaminantes.
- De acuerdo a las especies mineralógicas, el producto puede presentar una cinética más rápida que el cianuro, por lo que se aumentaría la producción en menor tiempo.

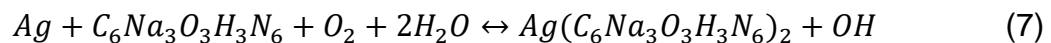
1.4.2 Reacciones del Dezo

El producto de este proceso tiene una pureza de 89 - 92%. La principal impureza es el exceso de carbonato de sodio con pequeñas cantidades de alofanato de sodio, ácido cianúrico, y urea. [3]

Reacción del Dezo con el oro (6):



Reacción del Dezo con la plata (7):



1.5 Carbón Activado

El carbón activado es el único agente utilizado para la recuperación, separación y purificación de muchas sustancias. Hasta 1700 fue reconocido como un agente purificador. Desde 1950 en los Estados Unidos el carbón activado se empleó como un material adsorbente de productos orgánicos en agua de desperdicio.

Una de las características más singulares del carbón activado, es una estructura porosa. Aunque la estructura submicroscópica no está bien determinada, se asume que puede estar compuesta de partículas amorfas al azar distribuidas para dar una compleja red de forma irregular en parte interconectada entre las partículas.

1.5.1 Recuperación del oro utilizando carbón activado

La recuperación, es a partir de soluciones ricas provenientes de los patios de lixiviación, esta es depositada en una pileta con suelo impermeable y es llamada “solución rica”. La solución rica es bombeada hacia la planta ADR, en la cual el oro es adsorbido por el carbón a medida que la solución desciende por rebosamiento en los trenes (columnas) de adsorción.

Ya cumplido el trayecto de solución a través de los trenes de adsorción, la solución sale de las columnas como “solución pobre o gastada”, debido a que la solución cuenta con valores de oro en bajas concentraciones, porque ya fue adsorbido en el carbón activado, esta solución desemboca a la pileta 2 o bien a la “pila pobre”, la cual será reutilizada para el riego de patios de lixiviación.

El diagrama de flujo se puede observar en la Figura 4.

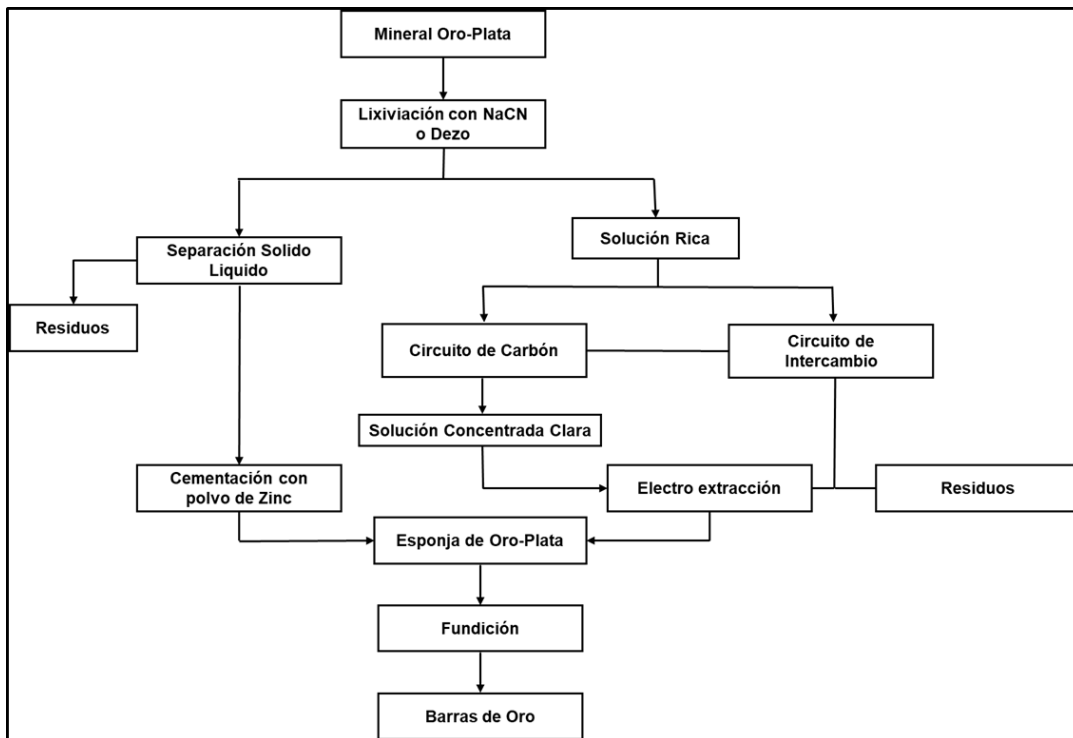


Figura 4. Metodología para una lixiviación de oro y plata y su recuperación por carbón activado

1.6 OBJETIVO GENERAL

Adsorción de valores de oro y plata utilizando carbón activado en columna de soluciones procedentes de una lixiviación con reactivo ecológico Dezo.

1.6.1 Objetivos Específicos

- Efecto de la saturación del carbón activado utilizando soluciones cianuradas y soluciones con reactivo ecológico Dezo.
- Efecto de la adsorción en columna de las soluciones provenientes de una lixiviación con cianuro y Dezo.
- Uso del modelo de Langmuir y Freundlich para cada ciclo de adsorción.

CAPITULO II

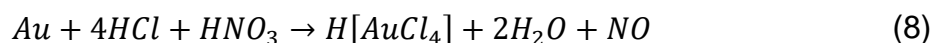
ANTECEDENTES

2.1 Agentes Lixiviantes Ecológicos

Con el pasar de los años se han buscado nuevas formas de obtener un medio lixivante alternativo al cianuro, ya que este mismo es considerado altamente contaminante. El cianuro se puede tratar para que pueda ser desechado, pero el costo de tratamiento de cianuro es considerable, por lo que las empresas mineras han estado en busca de un nuevo lixivante, que sea más amigable al medio ambiente y no se le tenga que invertir en tratamientos. Con el pasar de los años se han sintetizado varios productos semejantes al cianuro, como lo es el Dezo, Sandioss, GoldMax, entre otros varios, pero los resultados obtenidos no han justificado su aplicación en lugar del cianuro de sodio, pero están cerca, haciendo factible el uso de estos nuevos lixiviantes.

2.1.1 Lixiviación con Cloro

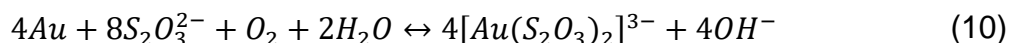
El más conocido ejemplo es la disolución de oro en agua regia (8), donde el oro es rápidamente lixiviado por el cloro a pH bajos (9).



La estabilidad del complejo $[AuCl_4]^-$ es altamente dependiente del pH de la solución, requiere altos niveles de cloro y cloruro, incremento en la temperatura y alta área superficial del mineral. Dada la inestabilidad y re-precipitación del complejo al entrar en contacto con agentes reductores, la aplicación de sistemas cloro/cloruro está limitada a la extracción de oro a partir de materiales oxidados. [9]

2.1.2 Lixiviación con Tiosulfato

La recuperación de metales preciosos utilizando tiosulfato fue por primera vez propuesto a comienzos de 1900 [14]. En solución, bajo condiciones alcalinas o cercanas a la neutralidad, el oro es disuelto lentamente en la presencia de un oxidante. La disolución de oro puede ser descrita como se ilustra a continuación (10), donde el oxígeno funge como oxidante y el tiosulfato como ligante.



Dentro de la literatura se han reportado dos complejos de tiosulfato, $[Au(S_2O_3)]^-$ y $[Au(S_2O_3)_2]^{3-}$, siendo este último el complejo más estable [8]. Una vez formado el complejo, se comporta de manera estable en comparación con otros complejos de oro.

2.2 Propiedades del Carbón Activado

El carbón activado es un material orgánico, el cual tiene una estructura esencialmente grafitica. Tiene una superficie especifica extremadamente grande, debido al alto desarrollo interno de la estructura porosa y un área superficial especifica que excede los $1000 \frac{m^2}{gr}$.

Las propiedades del carbón activado más importantes para la extracción del oro son:

- Capacidad de adsorción del oro
- Velocidad de adsorción del oro
- Esfuerzo mecánico y resistencia al uso
- Características de reactivación
- Distribución del tamaño de partícula

2.2.1 Adsorción sobre Carbón Activado

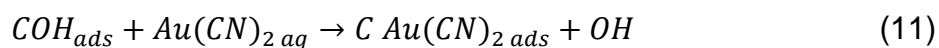
Este proceso se basa en la capacidad de ciertas sustancias sólidas para retener preferencialmente a especies iónicas o moleculares a partir de una disolución, en la actualidad se dispone de un gran número de adsorbentes, cuya característica más importante es su extensa área superficial por unidad de masa, en los procesos hidrometalúrgicos el adsorbente más utilizado para la recuperación de valores de oro y plata es el carbón activado.

El método del carbón activado consiste en la adsorción de determinados aniones metálicos, sobre los lugares de intercambio iónico de la superficie del carbón, cuando se pone en contacto con una solución rica. Al ser este un fenómeno superficial, la capacidad de carga del carbón activado en comparación con otros disolventes orgánicos o las resinas de intercambio iónico, es mucho menor. Por tal motivo los carbones son tratados como esteres de ácidos fosfóricos orgánicos, para mejorar su capacidad de carga. Existen dos etapas fundamentales en el proceso de intercambio iónico con carbón activado:

- La carga del adsorbente con los iones metálicos.
- La elución o despojamiento con una disolución acuosa adecuada.

2.2.2 Mecanismo de Adsorción sobre el Carbón Activado

El mecanismo de adsorción se presenta cuando los átomos de carbono pierden electrones quedan cargados positivamente, para mantener la neutralidad eléctrica, atraen hidroxilo adsorbiéndolos. Cuando este carbón activado se pone en contacto con la disolución acuosa, que contiene los iones metálicos se lleva a cabo la reacción en la que los iones hidroxilo se intercambian con dichos iones metálicos (reacción 11).



Los átomos de carbono pierden electrones, quedan cargados positivamente y atraen hidroxilos, adsorbiéndolos para mantener la neutralidad eléctrica. Cuando el carbón activado es puesto en contacto con la solución rica, los iones hidroxilo se intercambian con los iones metálicos. El proceso de adsorción no tiene lugar en ausencia de oxígeno, libera agua oxigenada cuando se borbotea dicho gas sobre carbón activado y la capacidad de adsorción se ve favorecida con una baja en el pH. La adsorción de oro y plata sobre carbón activado responde a la isoterma de Freundlich (ecuación 12):

$$m = kc^n \quad T = cte. \quad (12)$$

Donde:

- m = masa del complejo cianurado metálico adsorbido en el equilibrio
- c = concentración del complejo cianurado en la disolución
- k y n = constantes

2.2.3 Factores que afectan la Adsorción del Oro

Tipo de Carbón: Los carbones producidos usando diferentes métodos o materiales fuentes, tienen un rango de propiedades físicas, los cuales afectan la velocidad de adsorción y la capacidad de cargado. En general, los carbones de alta actividad son blandos, debido a una estructura porosa más extensa, la cual reduce la fuerza mecánica del carbón.

Tamaño de la partícula del carbón: Aunque la distribución del tamaño de partícula tiene un efecto significativo sobre el área superficial externa, tiene solo un efecto muy pequeño sobre el área de superficie específica, a causa de la altamente desarrollada estructura porosa interna. Como resultado, la máxima capacidad de carbón activado cargado, es virtualmente independiente del tamaño de partícula.

Cribado del Carbón: El cribado del carbón activado eficientemente se hace grande y se dificulta en tamaño finos (el cribado puede ser ejecutado a 0.7 – 0.8 mm en aplicaciones de pulpa).

Carbón Fino: El carbón activado fino es más susceptible a las pérdidas por atrición, a causa de su gran área superficial a radio de masa, y generalmente es reducido a un tamaño, donde puede dejar la planta más rápido que partículas de carbón activado gruesas.

Eficiencia de la mezcla: Este efecto es debido al hecho de que la mayoría de los sistemas de adsorción de carbón activado, son operados en un pseudoequilibrio, por debajo del equilibrio máximo de carga, donde la velocidad de adsorción es dependiente en alguna medida sobre la difusión a través de la capa límite sólido-líquido.

Temperatura: La adsorción de oro sobre carbón activado es exotérmica, el cual cuenta con la habilidad de invertir la adsorción por el incremento de temperatura. Consecuentemente, la capacidad de cargado de oro decrece en cuanto la temperatura se incrementa.

Concentración de oro: La velocidad de adsorción de oro y el equilibrio de la capacidad de cargado, ambos se incrementan con el aumento de la concentración de oro en la solución, como se muestra en la Figura 4.

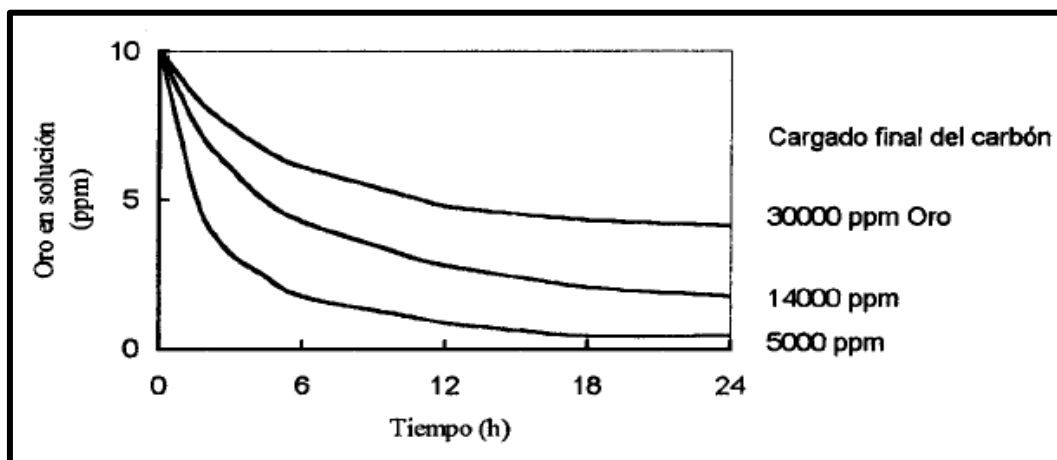


Figura 5. Cinética de adsorción del oro

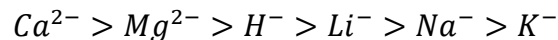
Concentración de cianuro: Tanto la velocidad de cargado y la capacidad de oro sobre carbón activado decrece con el incremento de la concentración de cianuro. Sin embargo, la selectividad de carbón activado para oro sobre otras especies cianuradas se incrementa con el aumento de la concentración de cianuro, como es aprovechado en el tratamiento de menas ricas en cobre.

Carbón Sucio: El carbón activado sucio, o envenenado, debido a la adsorción, precipitación o el atrape físico de otras especies y constituyentes de la mena, pueden tener un efecto adverso sobre la eficiencia de adsorción de oro.

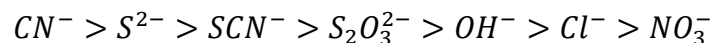
pH: Un decrecimiento en el pH de la solución incrementa tanto la velocidad de adsorción y la capacidad de cargado. El efecto sobre la velocidad de adsorción es completamente pequeño sobre el rango de pH dado entre 9-11, aplicado en circuitos de cianuración, con solo una pequeña ventaja de ser aumentado reduciendo el pH. La capacidad se incrementa aproximadamente 10% cuando el pH se baja de 11 a 9.

Fuerza Iónica: En este efecto se encuentra que los complejos de cianuro de oro pueden ser desprendidos del carbón activado con agua des-ionizada. Tanto la velocidad de adsorción como la velocidad de carga aumentan con el incremento de la fuerza iónica.

Concentración de otros metales: Bajo condiciones de laboratorio, la capacidad de cargado de oro aumenta con el incremento de la concentración de cationes en la solución en el orden:



Y decrece con la concentración de aniones en el orden:



2.2.4 Velocidad de Adsorción y Capacidad de Cargado de Oro sobre Carbón Activado

La adsorción de cianuro de oro sobre carbón activado, es muy dependiente de factores químicos y físicos, los cuales afectan tanto la velocidad de adsorción y el equilibrio de la capacidad de carga, factores que se pueden englobar en los análisis de las isothermas (Figura 6).

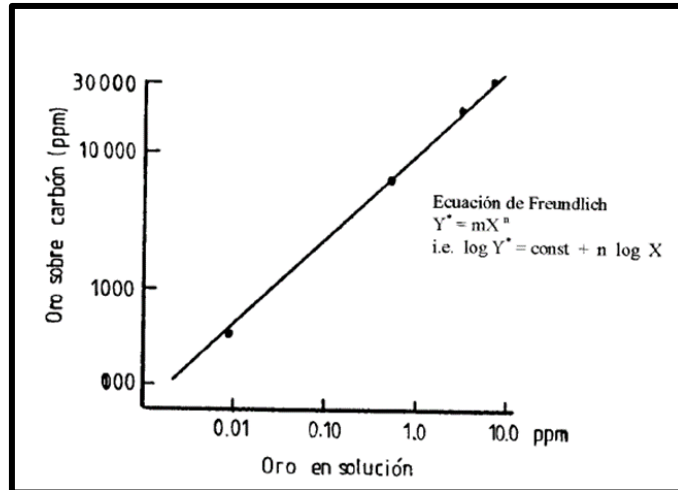


Figura 6. Isotherma de Freundlich

2.2.5 Contacto del carbón activado con la solución rica

El proceso más común es llamado Carbón en Columna (CIC), este proceso es similar al cambio de ion sobre resinas, se cuenta con una serie de cilindros (columnas) colocadas en cascada, donde los gránulos de carbón activado se sitúan retenidos en el fondo y la disolución proveniente de la lixiviación se introduce por el fondo del primer tanque de adsorción, atraviesa el lecho de carbón activado a una velocidad adecuada, se decanta y atraviesa el resto de los tanques con la misma secuencia.

El carbón activado que se recupera de la primera columna es eluído y se retorna a la última columna. La disolución que rebosa la última columna (libre de metales nobles) es bombeada a un tanque de almacenamiento, para ser recirculada a etapas anteriores del proceso extractivo.

2.3 Isotermas de Adsorción

La adsorción es un proceso dinámico en el que las moléculas de adsorción son retenidas y rechazadas simultáneamente por la superficie. A medida que el tiempo de contacto avanza la velocidad de adsorción disminuye y la velocidad de desorción aumenta, debido a que la superficie comienza a saturarse, hasta alcanzar el equilibrio. En este punto, las velocidades de adsorción y desorción son iguales. Para un sistema dado, el equilibrio de cantidad adsorción y desorción son iguales. Para un sistema dado, el equilibrio de cantidad adsorbida está en función de la presión o concentración del adsorbato y la temperatura según la ecuación. Las isotermas de adsorción proveen información importante respecto al adsorbente y adsorbato y al proceso de adsorción como tal; además ayudan en la determinación del volumen de poro, al área superficial del adsorbente y el calor de adsorción. [2]

Dentro del estudio de isotermas de adsorción existen distintos tipos de metodologías, de acuerdo con sus distintos autores las isotermas más utilizadas son: Freundlich, Langmuir y Brunauer, Emmett, Teller (BET), hay que tener en cuenta que las isotermas de Freundlich y Langmuir se enfocan en la adsorción química, en cuanto Brunauer, Emmett, Teller (BET) se focaliza en la adsorción física de gases en materiales porosos. [7]

2.3.1 Isotherma de Freundlich

Dentro de la isoterma de Freundlich, se la usa para describir la adsorción de soluciones acuosas. Este tipo de isoterma no puede definir el intervalo lineal en concentraciones muy bajas o el efecto de saturación a concentraciones muy altas, por ello se maneja concentraciones intermedias. La ecuación es la siguiente (13):

$$q_{eq} = (K)(C_{eq}^n) \quad (13)$$

Donde:

- K = el coeficiente de adsorción caracteriza la fuerza de adsorción, cuando mayor es el valor de k , mayor es la carga adsorbente que se puede lograr.
- n = se encuentra relacionado con la heterogeneidad energética de la superficie adsorbente y forma isotérmica y si la $n=1$, la gráfica se vuelve lineal, las isothermas con $n<1$ se considera favorables ya que muestran las altas cargas adsorbentes en concentraciones bajas. Si por el contrario $n>1$ se considera desfavorable. [4]

Ecuación lineal de Freundlich (14):

$$\ln q = \frac{1}{n} \ln C + \ln K \quad (14)$$

Donde:

- q = cantidad adsorbida
- K = coeficiente de distribución
- n = factor de corrección
- C = cantidad en el líquido (sin adsorber)

2.3.2 Isotherma de Langmuir

La isoterma de Langmuir, no suele ser el método adecuado para describir los datos de isothermas de soluciones acuosas. Este hecho se debe a que la derivación teórica de esta isoterma se basa en suposiciones que a menudo no se cumplen, como la cobertura de la mono-capa de la superficie del adsorbente y la homogeneidad energética de los sitios donde tienen lugar la adsorción. Su ecuación es la siguiente (15):

$$q_{eq} = \frac{(q_m)(b)(C_{eq})}{1 + (b)(C_{eq})} \quad (15)$$

Donde:

- Q_m = es el valor máximo al que puede tender q_{eq} . Representa la concentración del adsorbato sobre el adsorbente cuando se completa una capa mono molecular en la superficie del mismo.
- b = Parámetro de la ecuación. [4]

Ecuación lineal de Langmuir (16):

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{b}C + \frac{1}{kb} \quad (16)$$

Donde:

- q = cantidad adsorbida
- C = cantidad en el líquido (sin adsorber)
- k = fuerza de unión
- b = cantidad máxima adsorbida

2.3.3 Desorción y reactivación del carbón

El carbón activado cargado puede ser quemado, para recuperar en estado reducido los elementos contenidos, pero hay técnicas como la elución de los metales y la posterior reactivación del carbón activado para su reutilización, lo cual se realiza a condiciones de alta temperatura, valores de pH elevado y concentración elevada de cianuro, la fijación de iones calcio ayudara también. Las disoluciones de elución más usadas contienen hidróxido de sodio y cianuro sódico.

Se trabaja a 90°C para realizar la desorción, con un tiempo de elución cercano a las 48 horas, si se desea reducir tiempos se deberá trabajar a presión y aumentar la temperatura a 140°C, una alternativa para disminuir el tiempo es trabajar en presencia de 10% de alcohol, para tener mejores rendimientos. Una vez eluído y lavado el carbón activado este necesita ser activado nuevamente,

lo cual se realiza por tratamiento térmico de 600 a 900°C en un estado húmedo y con un control de la entrada de aire al sistema, tiene lugar una activación con vapor de agua y se elimina cualquier posibilidad de oxidación. Posteriormente se realiza un cribado para controlar la granulometría y de ser necesario, se procede a una etapa de lavado ácido para eliminar los posibles depósitos de carbonatos que se hayan podido formar.

2.3.4 Planta ADR

Uno de los procesos más utilizados para la recuperación de oro y plata obtenidos por medio de cianuración, es el de adsorción-desorción y recuperación, conocido también por sus siglas como ADR.

El proceso ADR, empieza cuando se recibe la solución rica proveniente generalmente de los patios de lixiviación, esta se deposita en una pila para de allí ser bombeada al proceso, primeramente, esta solución se pasa por un filtro malla que remueve cualquier impureza solida contenida en la solución rica.

Una vez filtrada la solución rica entra al circuito de columnas de carbón activado, este tipo de carbón activado tiene una estructura porosa que nos brinda una gran área superficial, lo que hace que sea un material ideal para la absorción, el carbón es activado en dos etapas: la activación térmica, que consiste en oxidar el carbón en una atmósfera de vapor, y la activación química donde el carbón es calentado en presencia de agentes deshidratantes.

La solución rica es inyectada por medio de bulbos (cuya función es mantener el carbón activado en suspensión) a la parte inferior de la primera columna, esta sube hasta desbordar por la parte superior, para ser enviada a la segunda columna y así sucesivamente hasta llegar a la última, después de esto la solución es filtrada por segunda ocasión y enviada a la pila de solución pobre, llamada así por el bajo contenido de oro presente en ella, típicamente la

columnas de carbón activado están arregladas en baterías de entre cuatro y seis y puede existir más de un circuito dentro de la planta ADR.

Dentro de cada columna el oro se va depositando en los poros del carbón activado, siendo la primera donde se tiene la mayor concentración de oro, la cual va disminuyendo conforme la solución es pasada de columna a columna, esperando de esta manera que la última columna contenga una solución con muy poco contenido de oro.

El carbón activado que es recuperado de las columnas cargado ahora con oro, es enviado a un tanque de lavado ácido, donde es sometido a un flujo constante de cianuro caustico, para extraer el oro de los poros del carbón activado, una vez que el carbón es despojado de los metales preciosos, la solución resultante es enviada a refinería, para ser tratada en un proceso de electrodeposición, y el carbón ya sin valores es enviada al horno de reactivación para continuar en el proceso.

CAPITULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

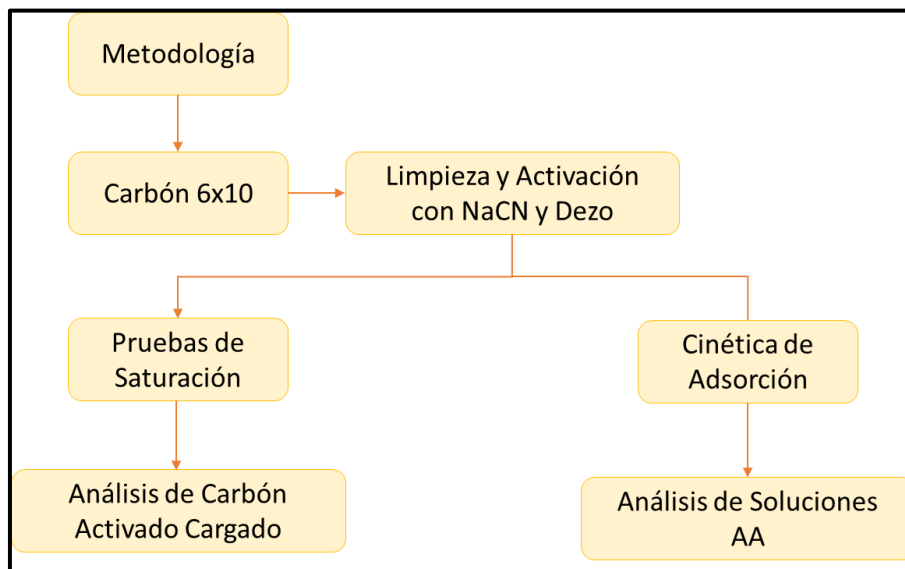


Figura 7. Diagrama de Flujo de Metodología del uso del Carbón.

El siguiente enlistado muestra los equipos y reactivos que se utilizaron en las pruebas de adsorción sobre carbón activado.

3.1 Equipo y reactivos a utilizar

3.1.1 Equipo

- Columnas de Adsorción
- Bomba peristáltica
- Crisoles
- Mufla
- Placa agitadora
- Matraz de 1 L
- Agitadores magnéticos
- Matraces de 250 mL

- Probeta de 1 L
- Balanza analítica

3.1.2 Reactivos

- Solución rica con Au
- HCl
- HNO_3
- Agua destilada
- Carbón activado
- $NaCNO$
- $NaCN$

3.2 Procedimiento experimental

Para el proyecto de investigación se utilizó un carbón activado de un tamaño de 6x10 mallas de la marca ClariMex, como se muestra en la Figura 8, con las siguientes propiedades físicas y químicas mostradas en la Tabla I.



Figura 8. Carbón Activado utilizado para las pruebas de saturación y adsorción de las soluciones de oro con Dezo.

Tabla I. Propiedades químicas y físicas del carbón activado

Químicas	Físicas
<ul style="list-style-type: none">• 75-80% en carbono• 5–10% en cenizas• 60% en oxígeno• 0.5% en hidrógeno. [13]	<ul style="list-style-type: none">• Tamaño de poros de 2 nm• Área superficial de $1000 \frac{m^2}{g}$• Poros con geometría tipo cilíndrico. [13]

3.3 Limpieza y Activación del Carbón

El carbón utilizado en las pruebas presento partículas finas, por lo que se procedió a darle una limpia de finos, como se muestra en la Figura 9.

La metodología fue la siguiente:

Antes de ser utilizado el carbón activado, se separó el material fino con el siguiente procedimiento: [12]

1.- Se lavó con agua destilada durante 30 minutos y utilizando una malla 10 serie Tayler para eliminar la mayor cantidad de finos.

2.- Se Procedió a realizar un lavado hasta obtener una solución de tonalidad cristalina Figura 9 (c), y no presentara exceso de finos como se muestra en la Figura 9 (b) color negro.

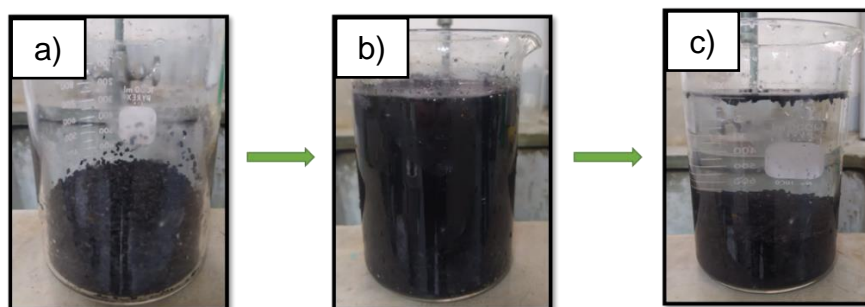


Figura 9. a) Carbón seco, b) Se le agrega agua para lavar y remover finos del carbón, c) Carbón ya limpio con agua cristalina.

3.- Enseguida se filtró la solución para separar toda partícula fina y el sólido remanente fue retirado y colocado en otro recipiente donde se aseguró que el carbón activado a utilizar no contiene finos como en la Figura 10.

4.- Una vez finalizada la etapa de filtración, el carbón activado se colocó en una bandeja y se secó a temperatura ambiente.

5.-El carbón seco obtenido se procedió a activarlo con una solución de Cianuro o Dezo, cuidando respectivamente su pH. El proceso de activación es dejar inundado el carbón limpio y seco en solución durante un tiempo no menor de 1 día, después se drena la solución dejando el carbón activado a secar durante otro día.



Figura 10. Carbón activado limpio sin finos

3.4 Pruebas de Saturación

Una vez completado el procedimiento del punto 3.3 (carbón limpio y activado con solución cianurada), se procede a realizar la prueba de saturación como se muestra en la Figura 11, que consistió:

1.- Dejar en agitación 1 gramo de carbón activado en 1 litro de solución rica por 72 horas.

Nota: La primera prueba preliminar de saturación se hizo en estándares con Cianuro de Sodio. Enseguida se realizaron las pruebas consiguientes con los estándares con Dezo.

2.- Se procede a dejar el carbón activado agitando en la solución rica a un tiempo determinado.

3.- Se toman alícuotas de 10 ml durante los tiempos de 15, 30, 45 minutos y 1, 3, 8, 16, 24, 48 y 72 horas. Con el uso del equipo de Absorción Atómica Analist 3110 Perkin Elmer se obtuvieron las concentraciones de cada tiempo.

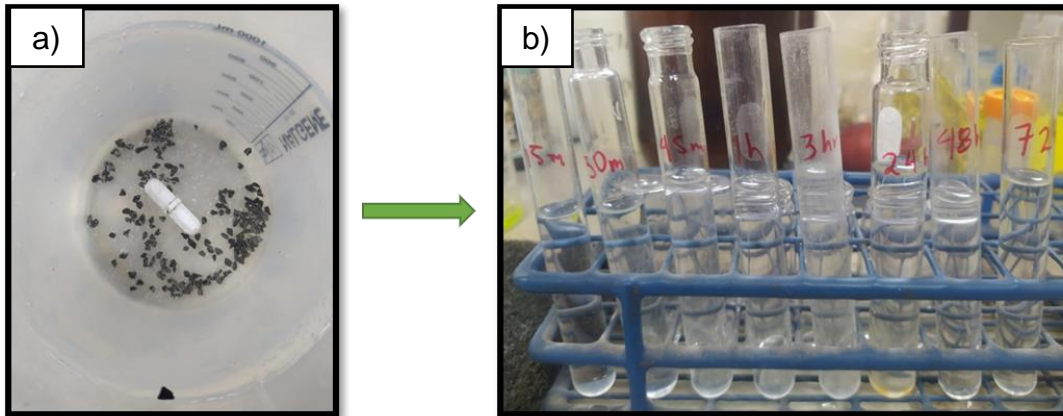


Figura 11. a) 1 gramo de carbón activado con solución rica, b) Alícuotas sacadas a determinado tiempo para su lectura en el equipo de A:A

4.- Una vez terminada la prueba de saturación agitada, se procede a drenar el litro de solución, donde contiene bajas concentraciones, a la cual se le denomina oro “pobre”.

5.- Se retira el gramo de carbón activado “cargado” con oro, y se seca a temperatura ambiente.

6.- Se procede a hacer la prueba de digestión del carbón activado cargado, el cual se encuentra seco.

3.5 Análisis Químico del Carbón Cargado

Para conocer la concentración de oro adsorbida en el carbón activado fue necesario realizar los siguientes puntos:

1.-Se enciende la mufla y se programa a 800°C durante una hora.

Nota: Es necesario como recomendación encender la mufla antes de realizar la fusión.

2.- Colocar el gramo de carbón activado cargado, esperar hasta que todo el carbón activado cargado llegue a ceniza, aproximadamente toma alrededor de 50 a 60 minutos y asegurándose que la mufla se encuentre a los 800°C.

3.- La ceniza se procede a colocarla en un vaso de precipitado con mucho cuidado para su posterior análisis, todo como se observa en la Figura 12.

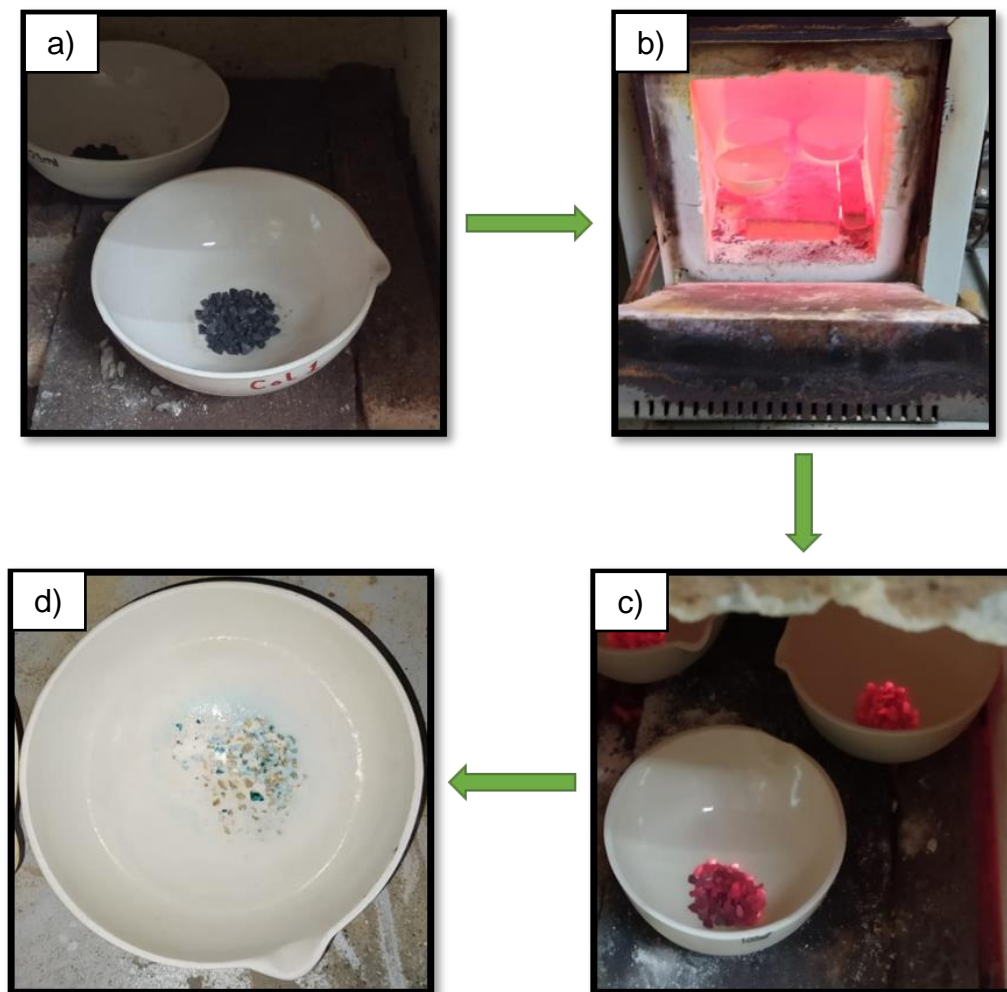


Figura 12. a) Gramo de carbón activado cargado en crisol, b) Muestras en la mufla a 800 °C, c) Carbón Activado cargado fundiéndose, d) Carbón activado llevado a ceniza

4.- Enseguida la ceniza se procede a hacerle una digestión acida para su posterior análisis.

5.- El análisis químico de la ceniza consistió en preparar ácido clorhídrico y

ácido nítrico para formar el agua regia, con una relación 2:1.

6.- La solución acida preparada se agrega al vaso de precipitado de un volumen de 500ml con la ceniza y se coloca en la placa a 170°C. Después se espera a que la solución presente una consistencia de jarabe, para después hacer una recuperación con 10 ml de ácido clorhídrico por 20 minutos, enseguida para detener la reacción se le agrega un poco de agua destilada y se sigue calentando por 5 minutos.

7.- El vaso se retira de la plancha de calentamiento y se deja enfriar para realizar el afore a 100 mililitros.

8.- Para determinar la concentración de oro se tomaron alícuotas de la solución para su posterior lectura en el equipo de absorción atómica, como se observa en la Figura 13.

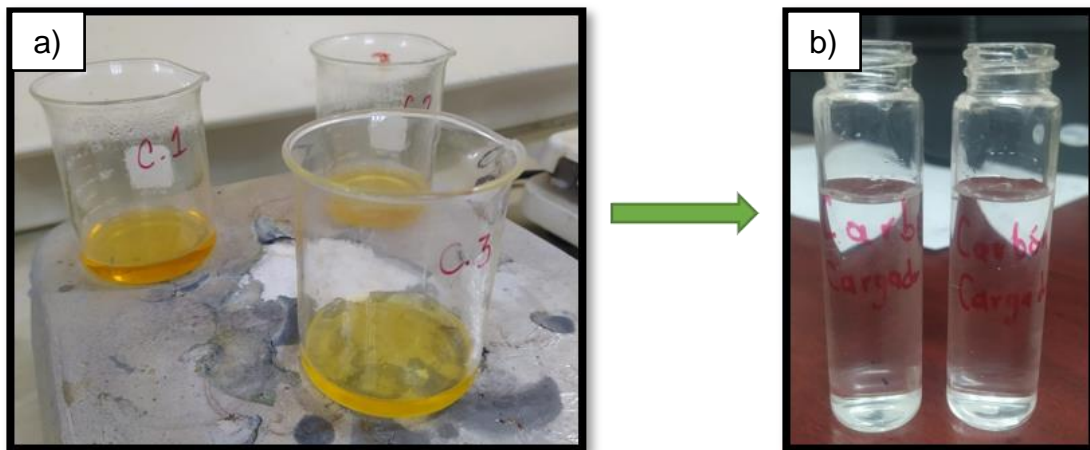


Figura 13 a) Ceniza del carbón activado cargado llevado a digestión ácida, b) Solución proveniente de la digestión ácida lista para su lectura en el equipo de Absorción Atómica.

3.6 Cinética de Adsorción

Para la determinación de la cinética de adsorción (Saturación), se siguieron los siguientes puntos:

La experimentación se realizó en 3 columnas con los siguientes parámetros; solución de entrada 0.78 ppm de Au, volumen de 1 litro, flujo de 1, 2 y 5 ml/min

y 5 gramos de carbón activado en las 3 columnas en continuo como se muestra en la Figura 14 inciso (a), (corresponde a 1 ciclo que la solución de entrada pase por las 3 columnas durante un tiempo determinado). Una vez terminado el ciclo con los datos experimentales obtenidos se ajustan a los modelos de adsorción descritos en las ecuaciones 13 y 14. La determinación de la adsorción de oro en las columnas se obtuvo, alimentando 1 litro de solución rica de oro, alícuotas de 15 ml y tiempos de 15, 30, 45 minutos, 1, 3, 8, 16, 24, 48 y 72 horas. Estas muestras fueron tomadas de la solución de salida que se encuentra al final de la tercera columna, como se observa en la Figura 14 inciso (b).

Para asegurar la máxima adsorción del oro, la solución final se volvió a recircular en las 3 columnas, hasta completar 3 ciclos o esperar que la concentración del oro se mantenga constante, la cual es analizada en el equipo de absorción atómica

Para conocer la cantidad de oro adsorbida se hizo el análisis químico del carbón activado con las técnicas de calcinación y digestión húmeda, para su posterior lectura en el equipo de Absorción atómica Analist 3110 Perkin Elmer. Con los valores obtenidos se realizan los balances metalúrgicos para conocer la recuperación de oro.

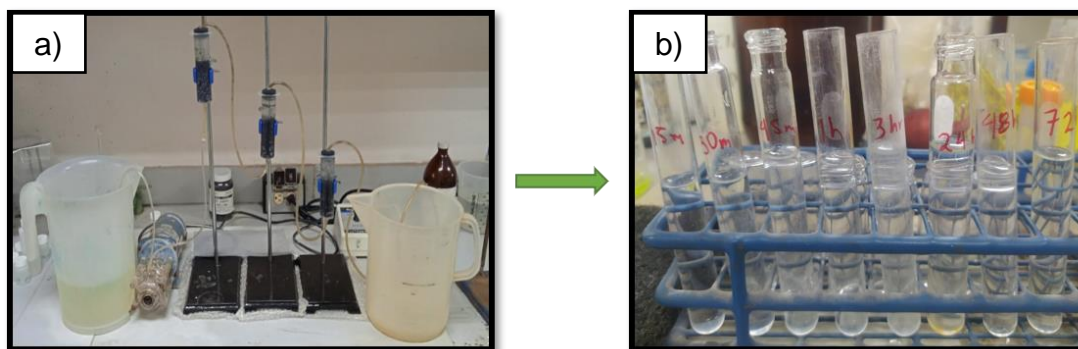


Figura 14. a) Sistema de columnas de carbón activado, b) Alícuotas tomadas a intervalos de tiempo para su lectura en el equipo de EAA.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis químico de las soluciones

Para realizar las primeras pruebas de adsorción y saturación, se analizaron las soluciones del licor con oro y plata, provenientes de una lixiviación con cianuro de sodio. Utilizando el equipo de absorción atómica, marca Perkin Elmer 3110, como se puede observar en la Tabla II.

Posteriormente para las pruebas de adsorción y saturación, se analizaron soluciones provenientes de una lixiviación con el reactivo químico Dezo (amigable al medio ambiente) como se muestra en la Tabla II.

Tabla II. Análisis químico de las soluciones

Licor de entrada en mg/L NaCN		Licor de entrada en mg/L NaCNO	
Au	Ag	Au	Ag
2.65	2.24	0.78	0.01

4.2 Caracterización del carbón activado de 6x10 utilizado en la investigación

Tabla III. Análisis físico químico del carbón activado para las pruebas de adsorción

Humedad %	Ceniza %	Materia Volátil %	Carbón Fijo %	Densidad aparente %	pH	Porosidad %
5.3	6.30	11.5	77.5	0.46	8.75	88

4.2.1 Morfología del carbón activado de 6x10 utilizado en la investigación

De acuerdo con lo descrito en el procedimiento experimental, el carbón activado fue caracterizado por diversas técnicas analíticas e instrumentales, para obtener una imagen morfológica del mismo, y la determinación de algunas propiedades físicas importantes. En la Tabla III se presenta un resumen de la caracterización del carbón activado, considerada como representativa para las condiciones de adsorción. El porcentaje de porosidad se relaciona con la clasificación de distribución de poros recomendada por IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry).

El elevado contenido de poros del carbón activado 6x10 (88.06%) le otorga un elevado valor de superficie específica de 985,69 m²/g, con un diámetro promedio de partícula de 2.51mm.

Para determinar la morfología se realizó un análisis mediante microscopía electrónica, para visualizar la superficie de los carbones activados de este estudio. Las imágenes capturadas mediante este equipo fueron obtenidas en una resolución de 100 y 600 aumentos en μm . En las Figuras 15 y 16 se presentan las micrografías electrónicas para el carbón natural, respectivamente.

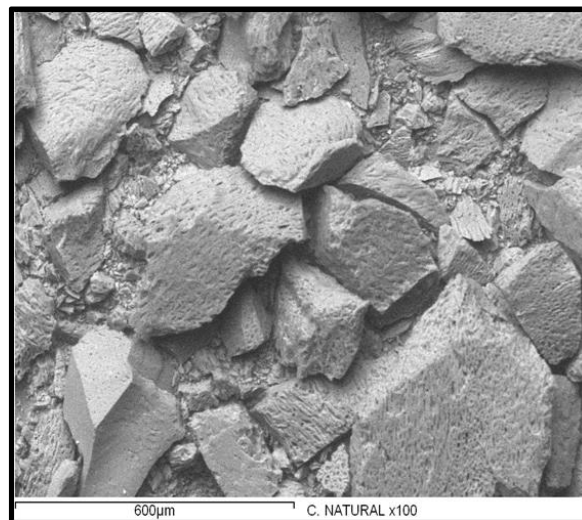


Figura 15. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10

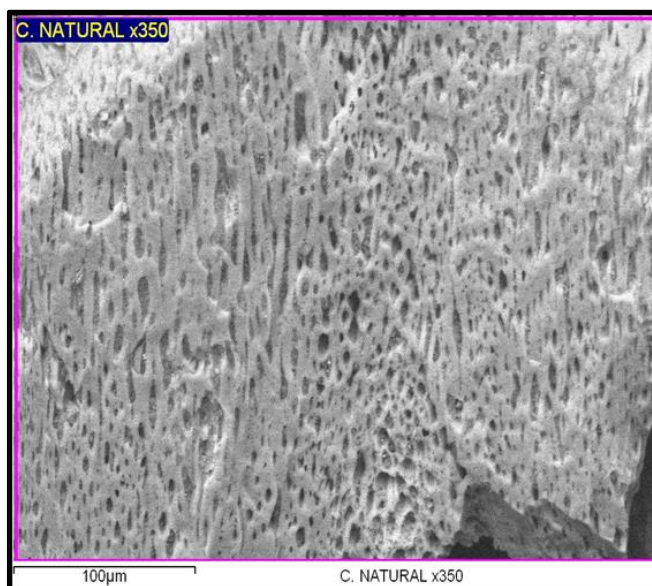


Figura 16. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10 listo para la adsorción del oro

Al observar las micrografías 15 y 16 se aprecia que su superficie es de tipo cavernosa, por la que hay múltiples irregularidades de hasta 100 µm de diámetro, los cuales contienen diversos tipos de poros en su interior. En la imagen a 350x se puede apreciar la gran cantidad de meso y microporos.

Debido a la interacción entre los electrones emitidos por el SEM y la muestra, se producen rayos X, que son detectados por el equipo y permiten realizar un análisis elemental correspondiente. La Figura 17 es el espectro de rayos X por energía dispersiva propio del carbón activado original.

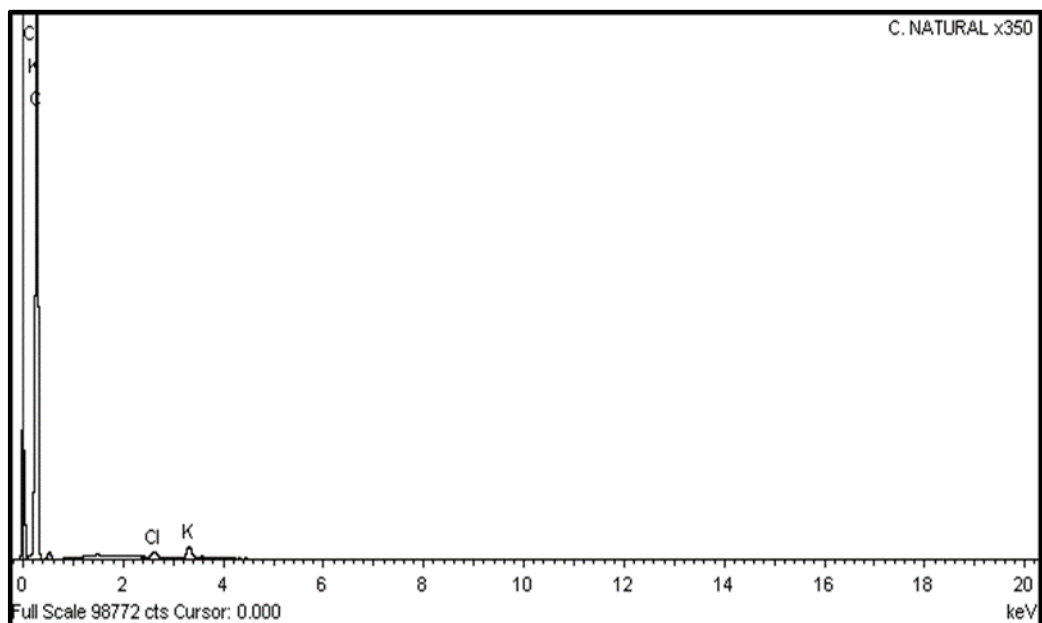


Figura 17. Análisis elemental por espectroscopía de rayos X por energía dispersiva para el carbón activado original.

Como se puede observar en el espectro de la Figura 17, los picos que presenta una mayor intensidad es la correspondiente al carbono, además existen dos picos adicionales de cloro, y potasio, que corresponden al contenido de cenizas en el carbón. En la Tabla IV se presenta la composición elemental en porcentaje del carbón activado original, realizado por espectroscopía de rayos X por energía dispersiva.

Tabla IV. Composición elemental del carbón original

Elemento	% Peso	% Atómico
C	98.56	99.54
Cl	0.42	0.14
K	1.03	0.32
Total	100.00	

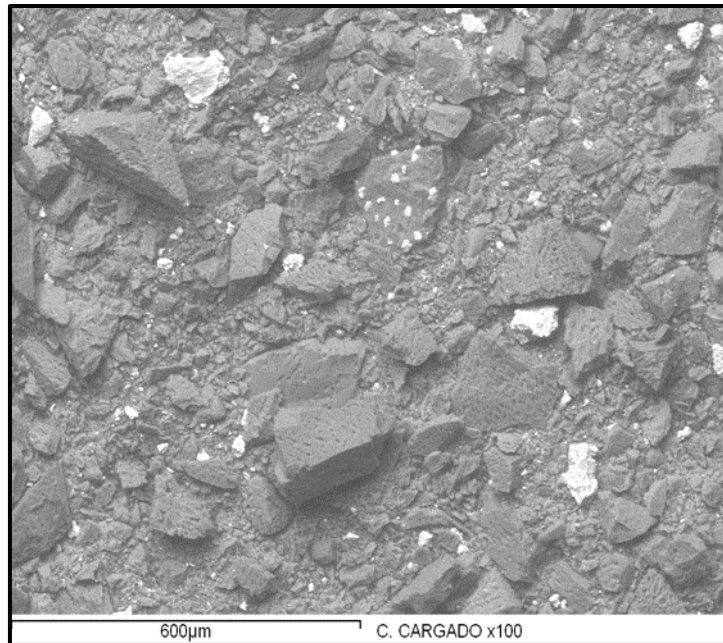


Figura 18. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10 cargado con oro

Para estas micrografías se puede observar claramente en las Figuras 18, 19 y 20, cómo el oro queda impregnado en la superficie del carbón activado, en este caso, ocupando los poros disponibles en el carbón activado. Se puede apreciar que el carbón activado no solo fue recubierto, sino que su superficie fue alterada de cierta forma, tomando el aspecto de partículas blancas que también llenaron los poros notablemente visibles y de acuerdo con el EDS, se puede deducir que es la cal que se encontró disponible al momento de la activación del carbón.

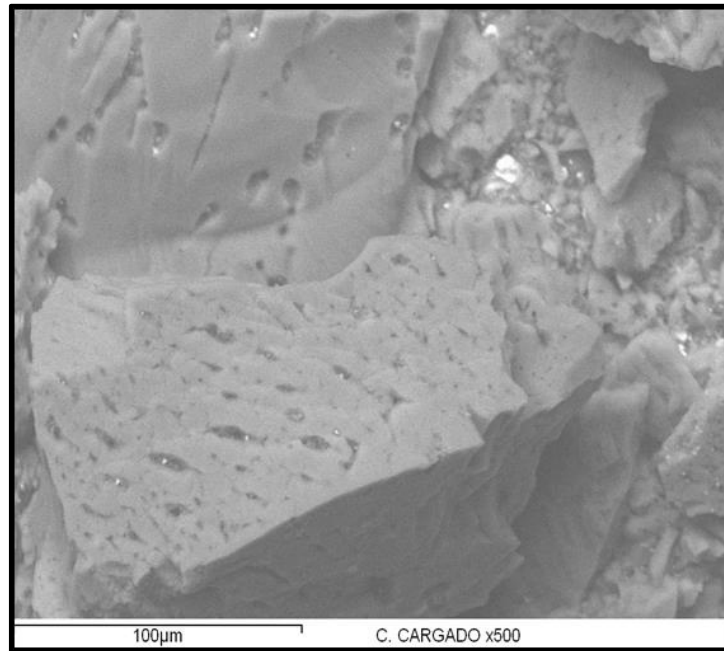


Figura 19. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10 cargado con oro a 500x



Figura 20. Micrografía Electrónica del carbón natural 6x10 cargado con oro a 500x

Al igual que el carbón activado original, se realizó el análisis elemental para el compuesto desarrollado. La Figura 21 es el espectro de rayos X por energía dispersiva propio del carbón activado-cargado.

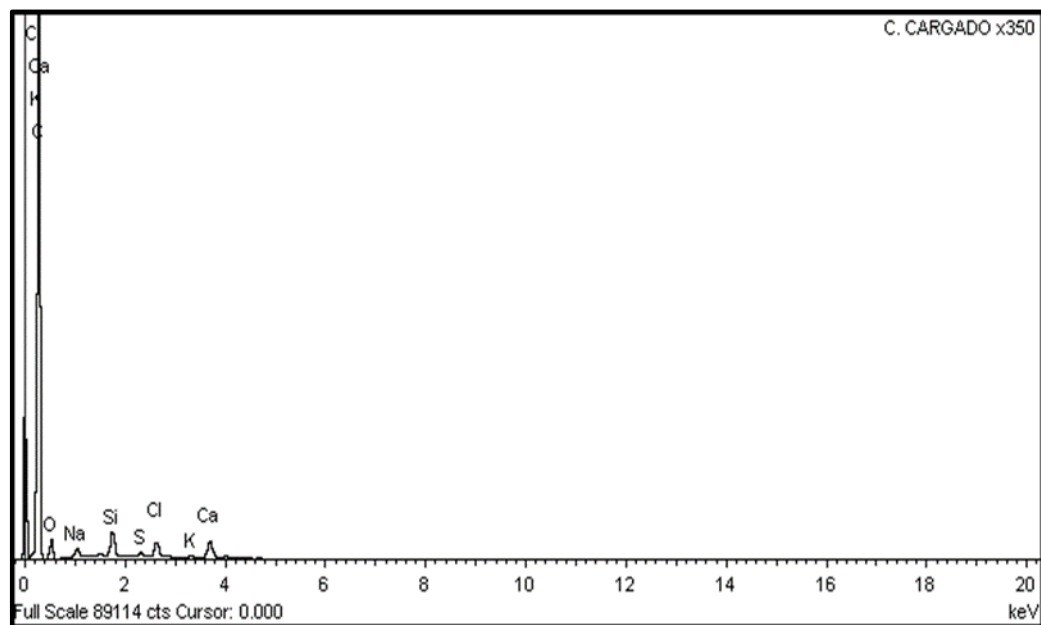


Figura 21. Análisis elemental por espectroscopía de rayos X por energía dispersiva para el carbón activado cargado con oro.

El cambio en el espectro de rayos X de la Figura 21 es claramente notorio. Se puede apreciar que el pico de intensidad de carbono ha disminuido en más de la mitad, mientras que el pico en intensidad de Ca es la predominante, de igual forma las señales de sodio y silicio han aumentado y han aparecido en cierta proporción. Cabe destacar que la disminución del pico de intensidad de carbono se debe a que, el análisis elemental es semicuantitativo y solo es realizado en la superficie exterior de la muestra, y por lo que se ha demostrado, es el sitio con mayor presencia de oro.

Al igual que el carbón activado original, se determinó la composición elemental en porcentaje para el carbón cargado. En la Tabla V se encuentra la composición elemental en porcentaje del carbón cargado, realizado por espectroscopía de rayos X por energía dispersiva.

Tabla V. Composición elemental en porcentaje del carbón activado cargado

Elemento	% Peso	% Atómico
C	54.78	65.33
O	30.26	27.09
Na	0.19	0.12
Si	14.21	7.25
S	0.05	0.02
Cl	0.17	0.07
K	0.13	0.05
Ca	0.22	0.08
Total	100.00	

4.3 Caracterización del Reactivo Dezo

Para las pruebas de carbón activado, fue necesaria la caracterización del reactivo Dezo, por medio de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), y por espectroscopia Raman, como se observan en las Figuras 22 y 23. [3]

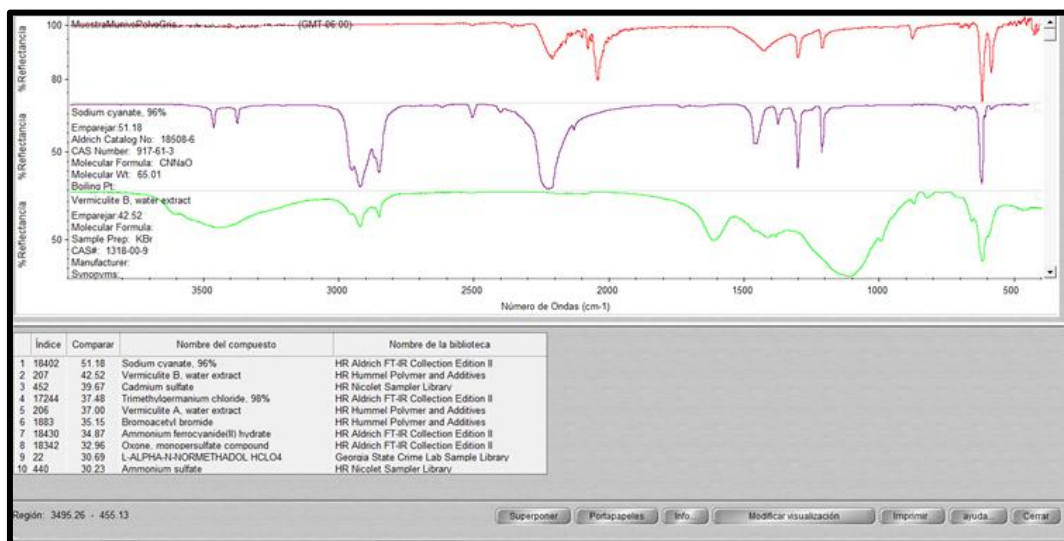


Figura 22. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) del reactivo DEZO.

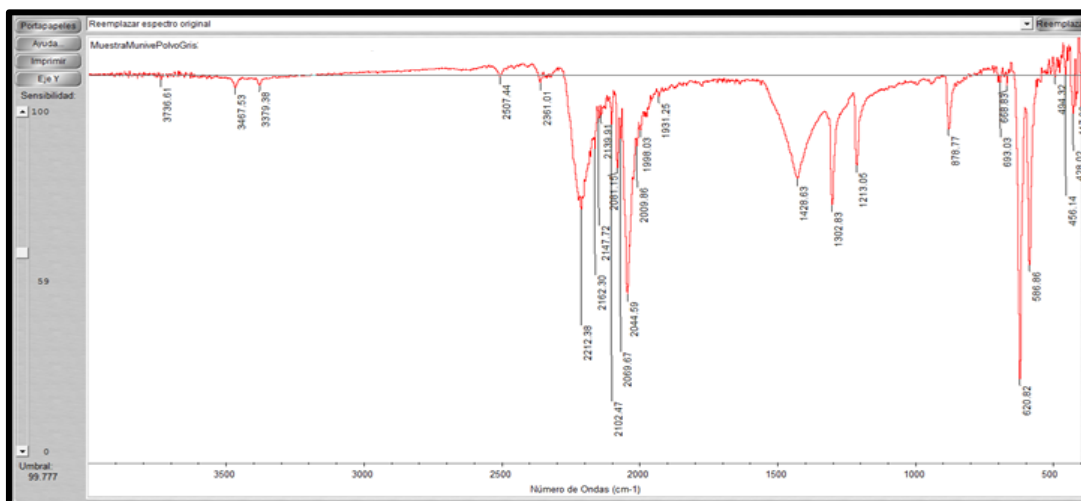


Figura 23. Espectroscopia Raman del reactivo Dezo.

Como nos muestran las diferentes técnicas de caracterización, tanto en FTIR y Raman del compuesto lixiviable, para oro y plata con características de cinética rápida en la disolución de valores de oro, esta velocidad de solubilidad se asume que es por el oxígeno, que posee la estructura molecular del CNO, como se muestra en la Figura 22.

El material presenta características de síntesis orgánica a partir de urea y carbonato de sodio, para formar el cianato de sodio y amonio, cuando este sea necesario, este compuesto es dos mil veces menos tóxico que el cianuro de sodio, ya que el ion CNO es menos tóxico que el cianuro y más amigable al medio ambiente.

4.4 Pruebas de Saturación

Las primeras pruebas de saturación se realizaron utilizando un carbón de un tamaño de 6x10. Donde se añadió solución de cianuro de sodio a una concentración de 100 ppm y 1 g de carbón activado a 1 L de solución rica.

Como segunda prueba, a medida de comparación se realizaron las saturaciones de soluciones ricas con Dezo, a una concentración de 100ppm, 1g de carbón a 1 L de solución. Los datos experimentales obtenidos se muestran en la Tabla VI:

Tabla VI. Prueba de Saturación Agitada con NaCN con una concentración de 100 ppm y un tamaño de carbón de 6x10.

Tiempo (h)	mg/L de Au	%
0	2.65	0
0.25	2.5	5.66
0.5	2.47	6.79
0.75	2.35	11.32
1	2.34	11.69
3	1.94	26.79
8	1.1	58.49
16	0.68	74.33
24	0.49	81.50
36	0.34	87.16
60	0.24	90.94
72	0.22	91.70

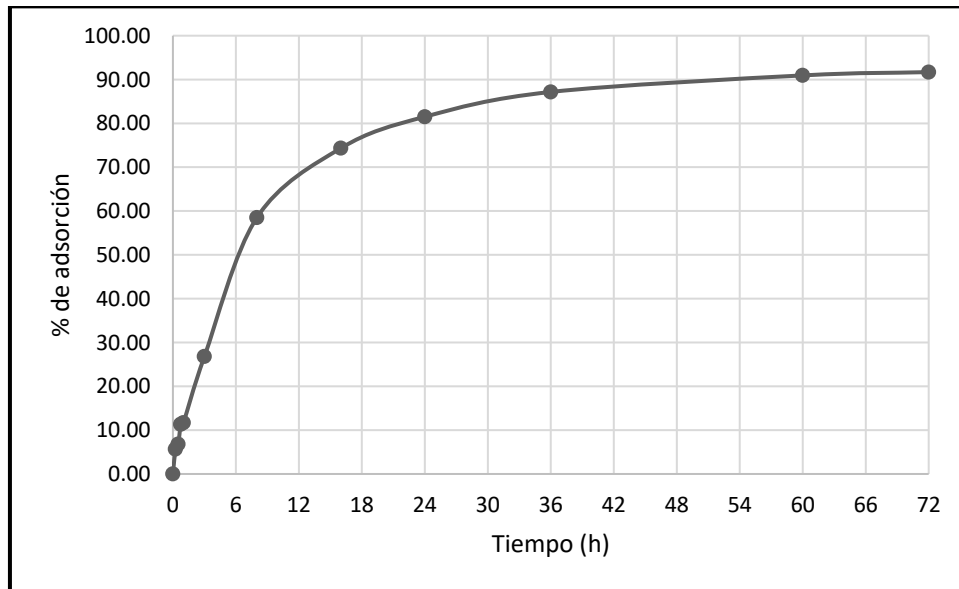


Figura 24. Grafica de la adsorción de una solución cianurada en carbón activado con NaCN y solución de aurocianuro de 2.65mg/L.

Como se muestra en la Tabla VI, se llegó a una saturación de Oro en solución de NaCN en un tiempo de 72 horas, y un % adsorbido del 94.33%, en la Figura 24 se muestra la cinética de saturación de la adsorción del carbón activado, donde a partir de las 36 horas empieza a mantenerse constante la adsorción para este tipo de soluciones.

Tabla VII. Prueba de Saturación Agitada con NaCNO a una concentración de 100 ppm y un tamaño de carbón de 6x10.

Tiempo (h)	mg/L de Au	%
0	0.78	0
0.25	0.69	11.53
0.5	0.68	12.82
0.75	0.67	14.10
1	0.66	15.38
3	0.58	25.64
8	0.48	38.46
16	0.32	58.97
24	0.22	71.79
36	0.15	80.77
48	0.13	83.33
72	0.12	83.61

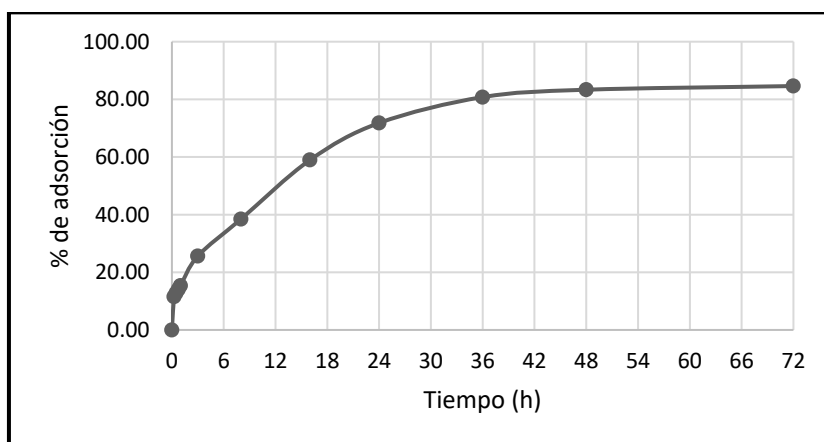


Figura 25. Grafica de la adsorción de una solución de Dezo en carbón activado a una concentración de 100 ppm.

En la Tabla VII, se presenta que la saturación de las soluciones de Oro en matriz de NaCNO fueron a partir de un tiempo de 48 horas, y enseguida se presentó la estabilidad de la adsorción del oro, en la Figura 25 se muestra la cinética de saturación de la adsorción del carbón activado, donde a partir de las 48 horas se presenta el cambio en la curva manteniendo constante la adsorción para este tipo de soluciones.

Tabla VIII. Prueba de Saturación Agitada con NaCNO con una concentración a 300 ppm y un tamaño de carbón de 6x10.

Tiempo (h)	mg/L de Au	%
0	0.78	0
1	0.55	29.48
8	0.37	52.56
24	0.28	64.10
48	0.28	64.10
72	0.28	64.10

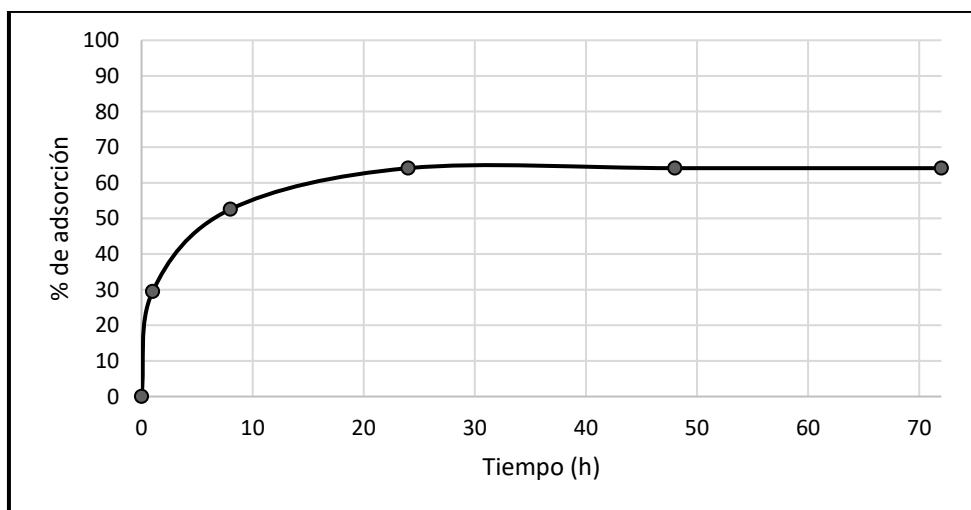


Figura 26. Grafica de la adsorción de una solución de Dezo en carbón activado a una concentración de 300 ppm.

Como se muestra en la Tabla VIII, se llegó a una saturación de Oro en NaCNO a un tiempo de 24 horas, y en la Figura 26 se muestra la cinética de saturación de la adsorción del carbón activado, donde a partir de las 24 horas se presenta el cambio en la curva manteniéndose constante la adsorción para este tipo de soluciones. Como se puede observar en este tipo de parámetros la adsorción de oro en NaCNO no es muy favorable a altas concentraciones.

Tabla IX. Prueba de Saturación Agitada con carbón activado con NaCN con una concentración de 100 ppm y solución lixiviada de Au con NaCNO

Tiempo (h)	mg/L de Au	%
0	0.78	0
0.25	0.53	32.05
0.5	0.52	33.33
0.75	0.51	34.61
1	0.51	34.61
3	0.51	34.61
24	0.35	55.12
48	0.31	60.25
72	0.29	62.82

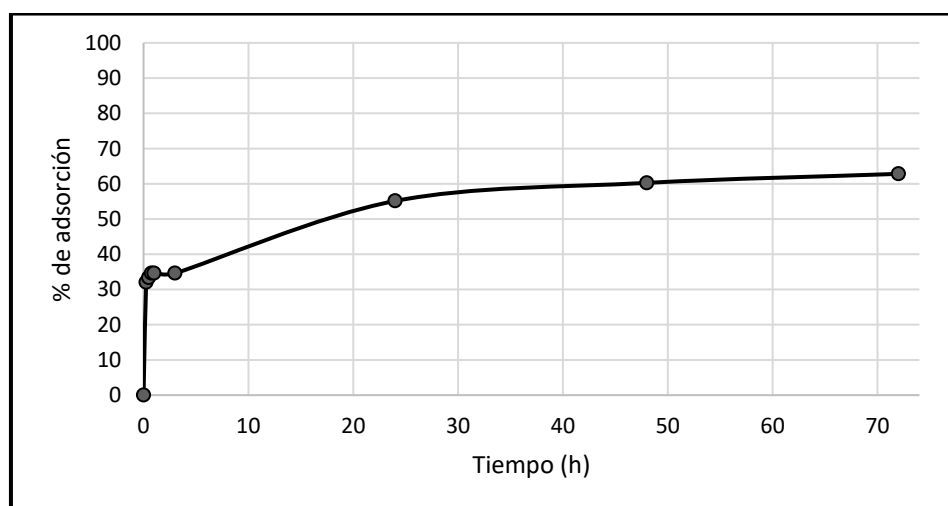


Figura 27. Grafica de la adsorción de una solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.

Como se muestra en la Tabla IX, se llegó a una saturación de Oro en NaCNO a un tiempo de 24 horas, y en la Figura 27 se muestra la cinética de saturación de la adsorción del carbón activado, donde a partir de las 24 horas se presenta el cambio y se observa que la curva se mantiene constante para la adsorción en este tipo de soluciones. Este tipo de prueba no obtuvo buenos resultados debido a los parámetros utilizados (combinación de NaCN y NaCNO).

4.5 Pruebas de adsorción utilizando el modelo de Langmuir y Freundlich

Los siguientes análisis fueron realizados utilizando como herramienta las isothermas de Langmuir y de Freundlich, esto para ver determinar las altas cargas adsorbentes en concentraciones bajas de oro.

4.5.1 Prueba de Saturación Agitada con NaCN

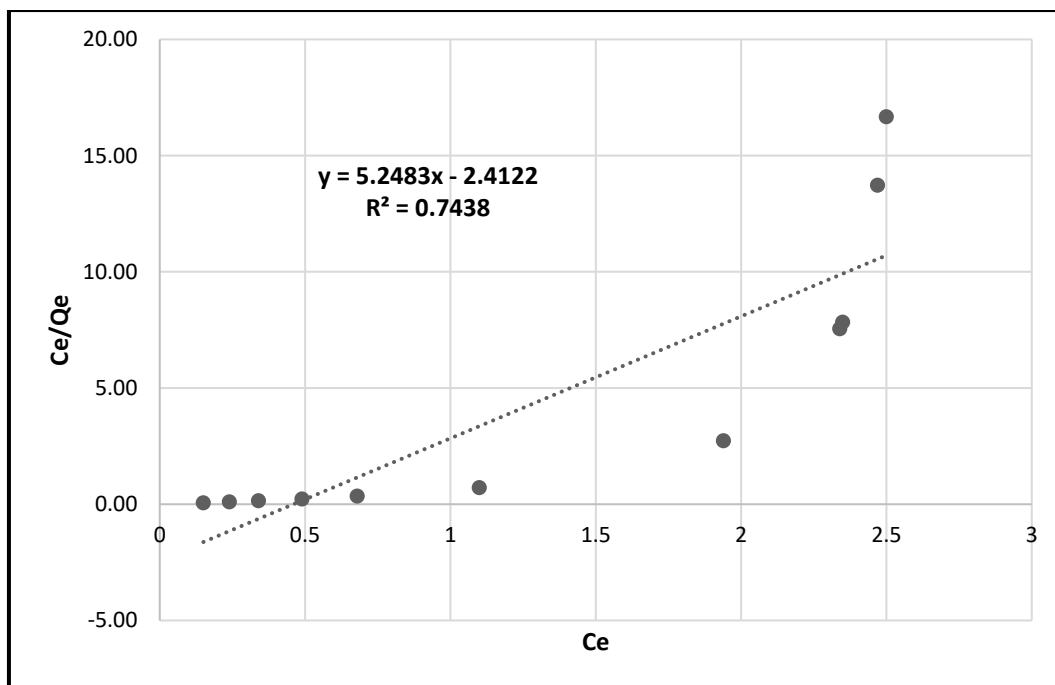


Figura 28. Grafica utilizando el modelo de Langmuir de una solución cianurada en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.

Tabla X. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Langmuir para la solución cianurada en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.

b=	0.19
K=	-2.18

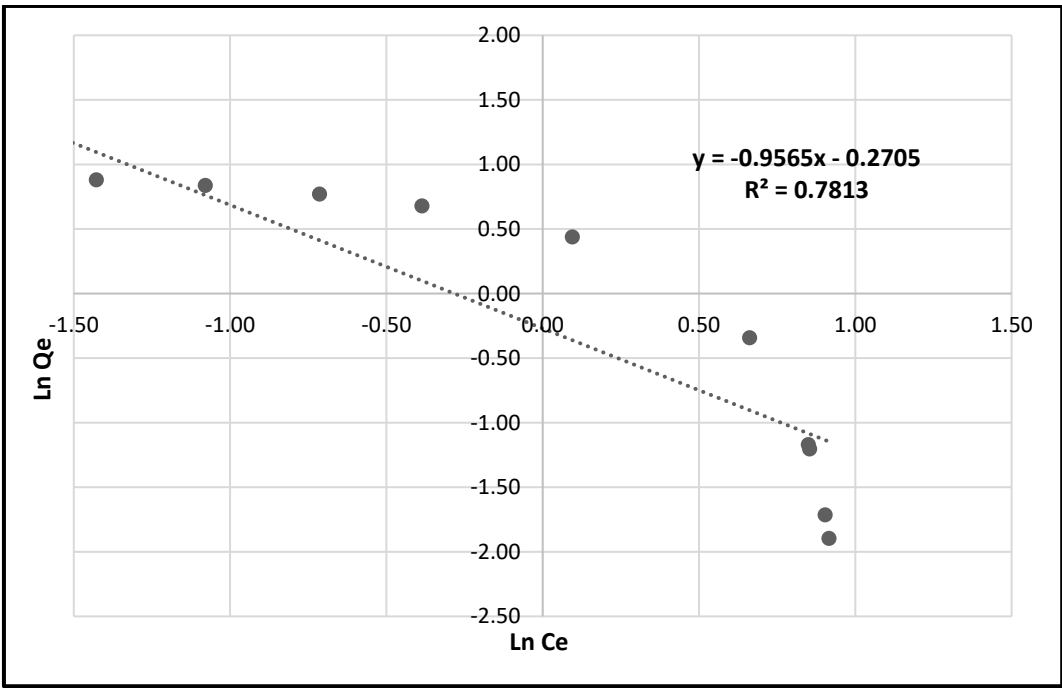


Figura 29. Grafica utilizando el modelo de Freundlich de una solución cianurada en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.

Tabla XI. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Freundlich para la solución cianurada en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.

n=	-1.05
K=	0.76

De acuerdo con los factores de correlación R obtenidos de los modelos de Langmuir y Freundlich de la Tabla X y XI, el modelo que más se ajusta a esta prueba es el de Freundlich de la Figura 29, donde se obtuvo una $R^2= 0.7813$ mientras que en Langmuir se obtuvo una $R^2= 0.7438$

4.5.2 Prueba de Saturación Agitada con NaCNO a una concentración de 100 ppm

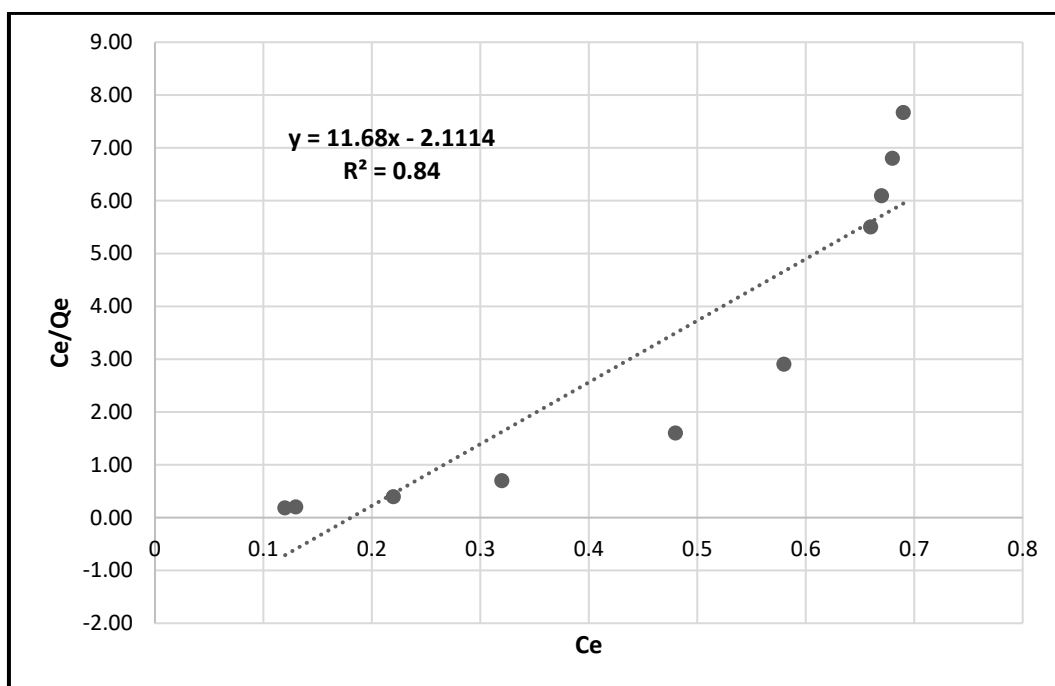


Figura 30. Grafica utilizando el modelo de Langmuir de una solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 100 ppm.

Tabla XII. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Langmuir para la solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 100 ppm.

b=	0.09
K=	-5.53

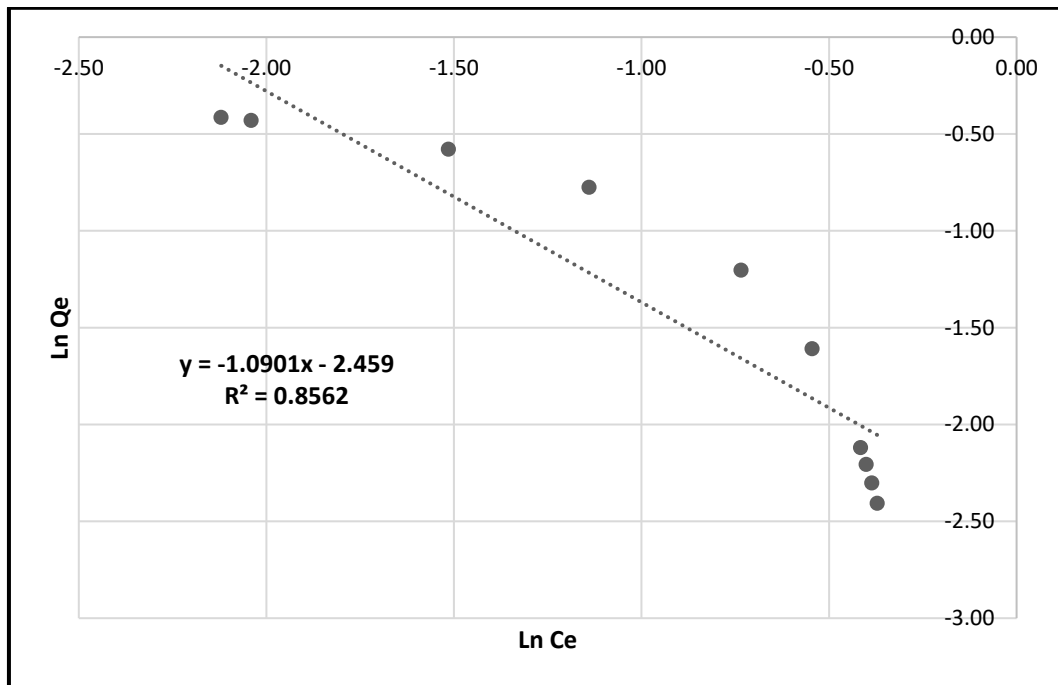


Figura 31. Grafica utilizando el modelo de Freundlich de una solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 100 ppm.

Tabla XIII. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Freundlich para la solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 100 ppm.

n=	-0.92
K=	0.09

De acuerdo con los factores de correlación R obtenidos de los modelos de Langmuir y Freundlich de la Tabla XII y XIII, el modelo que más se ajusta a esta prueba es el de Freundlich de la Figura 31, donde se obtuvo una $R^2= 0.8562$, mientras que en Langmuir se obtuvo una $R^2= 0.84$

4.5.3 Prueba de Saturación Agitada con NaCNO a una concentración de 300 ppm

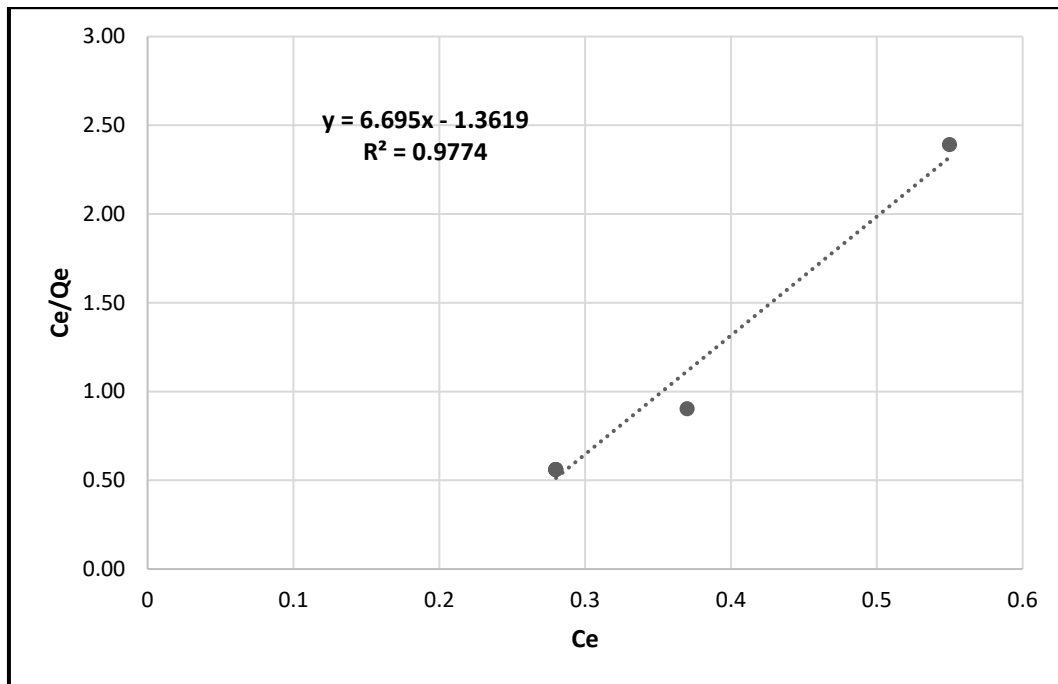


Figura 32. Grafica utilizando el modelo de Langmuir de una solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 300 ppm.

Tabla XIV. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Langmuir para la solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 300 ppm.

b=	0.15
K=	-4.92

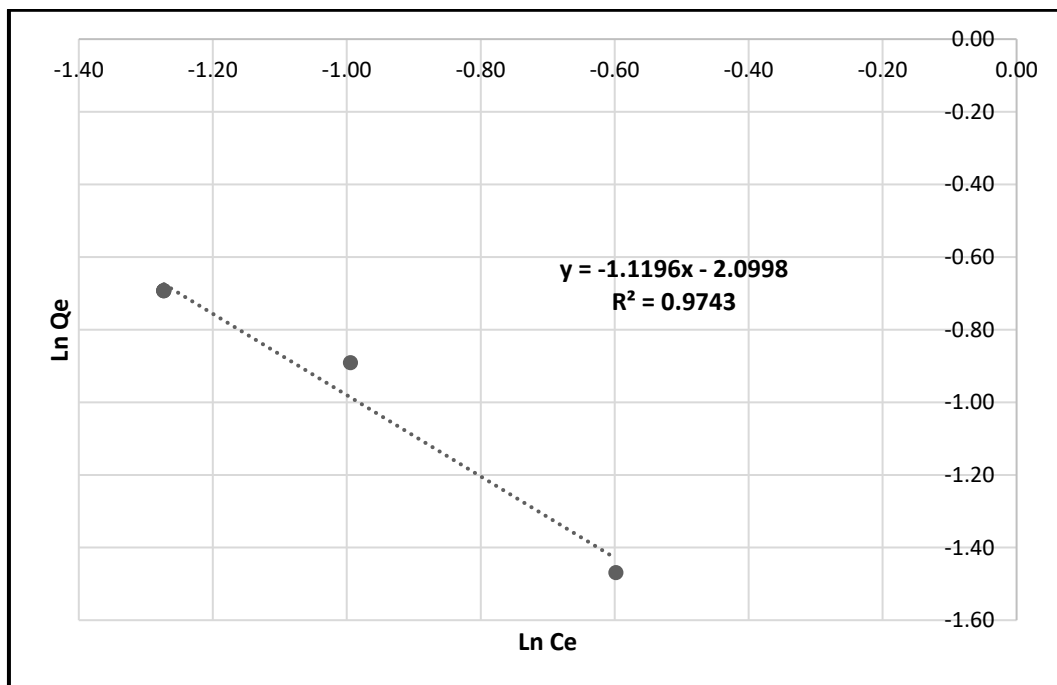


Figura 33. Grafica utilizando el modelo de Freundlich de una solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 300 ppm.

Tabla XV. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Freundlich para la solución de Dezo en carbón activado con NaCNO a una concentración de 300 ppm.

n=	-0.89
K=	0.12

De acuerdo con los factores de correlación R obtenidos de los modelos de Langmuir y Freundlich de la Tabla XIV y XV, el modelo que más se ajusta a esta prueba es el de Langmuir de la Figura 32 donde se obtuvo una $R^2= 0.9774$, mientras que en Freundlich se obtuvo una $R^2= 0.9743$

4.5.4 Prueba de Saturación Agitada con carbón activado con NaCN con una concentración de 100 ppm y solución lixiviada de Au con NaCNO

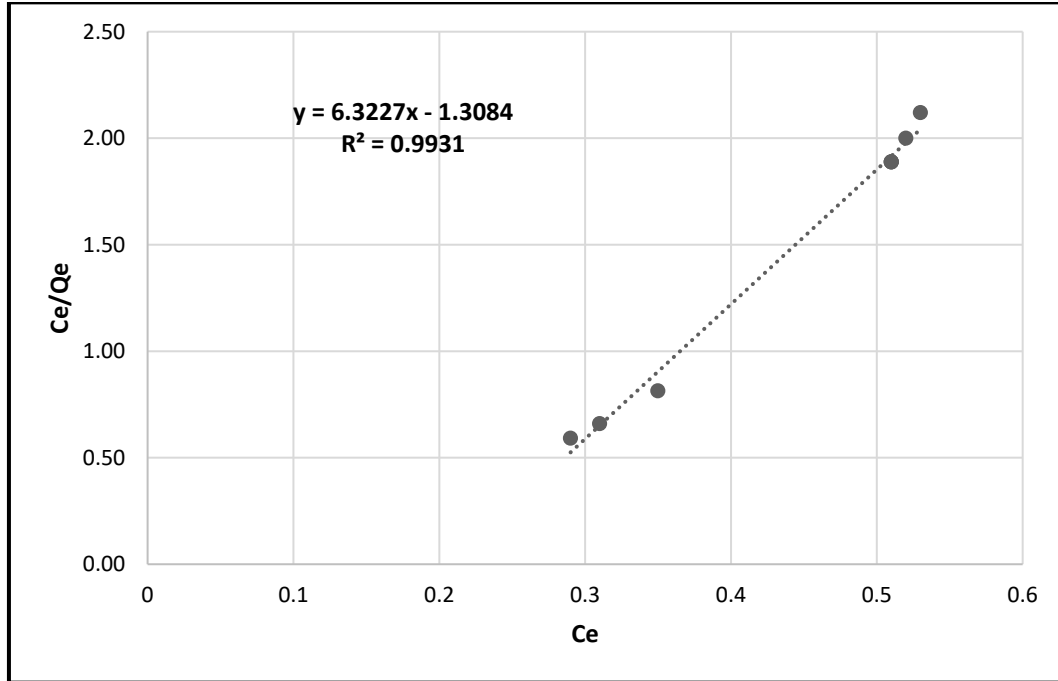


Figura 34. Grafica utilizando el modelo de Langmuir de una solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.

Tabla XVI. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Langmuir para la solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.

b=	0.16
K=	-4.83

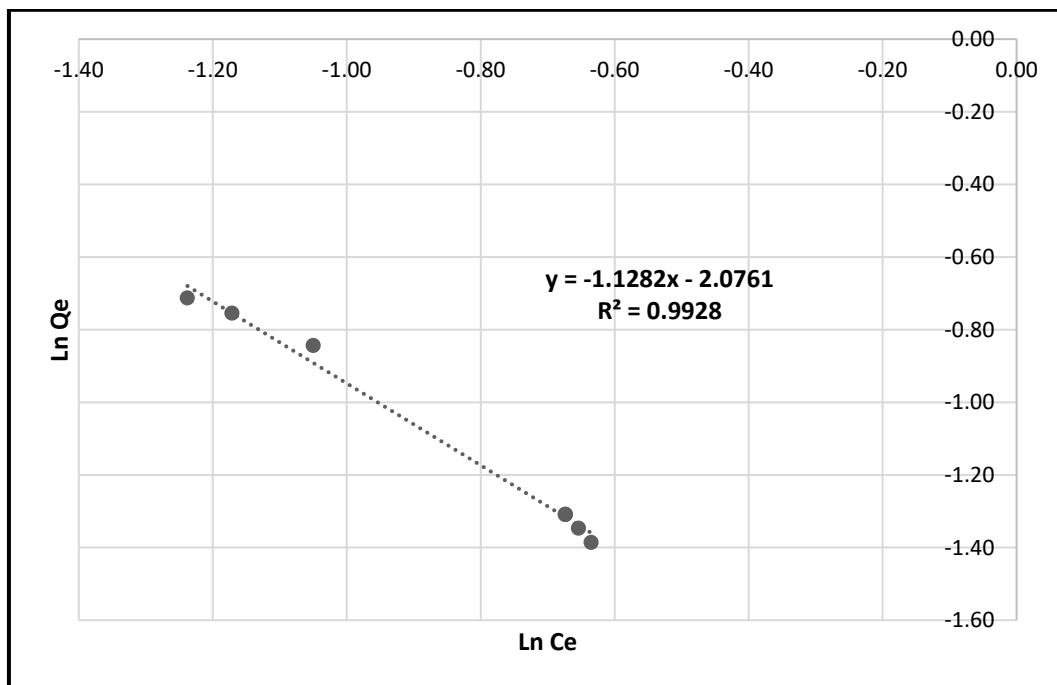


Figura 35. Grafica utilizando el modelo de Freundlich de una solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.

Tabla XVII. Constante de adsorción K y pendiente obtenidas por el modelo de Freundlich para la solución de Dezo en carbón activado con NaCN a una concentración de 100 ppm.

n=	-0.89
K=	0.13

De acuerdo con los factores de correlación R obtenidos de los modelos de Langmuir y Freundlich de la Tabla XVI y XVII, utilizando los datos experimentales de las pruebas cinéticas se observó que el modelo que más se ajusta a esta prueba es el de Langmuir de la Figura 34, donde se obtuvo una $R^2 = 0.9931$, mientras que en Freundlich se obtuvo una $R^2 = 0.9928$.

4.6 Balances de columnas

Las siguientes pruebas fueron hechas en columnas a nivel laboratorio, utilizando diferentes parámetros para determinar cuál es el más óptimo en cuanto a operación.

Tabla XVIII. Columnas con 5g de carbón activado a una concentración de 300 ppm a 4 ciclos y una solución de entrada de oro de 0.78 ppm

Ciclos	Flujos ml/min	Recuperación Au mg/día
1	5	3.82
2	2	1.61
3	2	1.61
4	2	1.61

Tabla XIX. Columnas con 2g de carbón activado a una concentración de 100 ppm a 4 ciclos y una solución de entrada de oro de 0.78 ppm

Ciclos	Flujos ml/min	Recuperación Au mg/día
1	5	2.95
2	2	1.38
3	2	1.29
4	2	1.26

Tabla XX. Columnas con 5g de carbón activado a una concentración de 300 ppm a 2 flujos y una solución de entrada de oro de 0.78 ppm

Ciclos	Flujos ml/min	Recuperación Au mg/día
1	1	0.98
1	10	7.92

Tabla XXI. Columnas con 5g de carbón activado a una concentración de 100 ppm a un solo flujo y una solución de entrada de oro de 0.78 ppm

Ciclos	Flujos ml/min	Recuperación Au mg/día
1	1	0.92

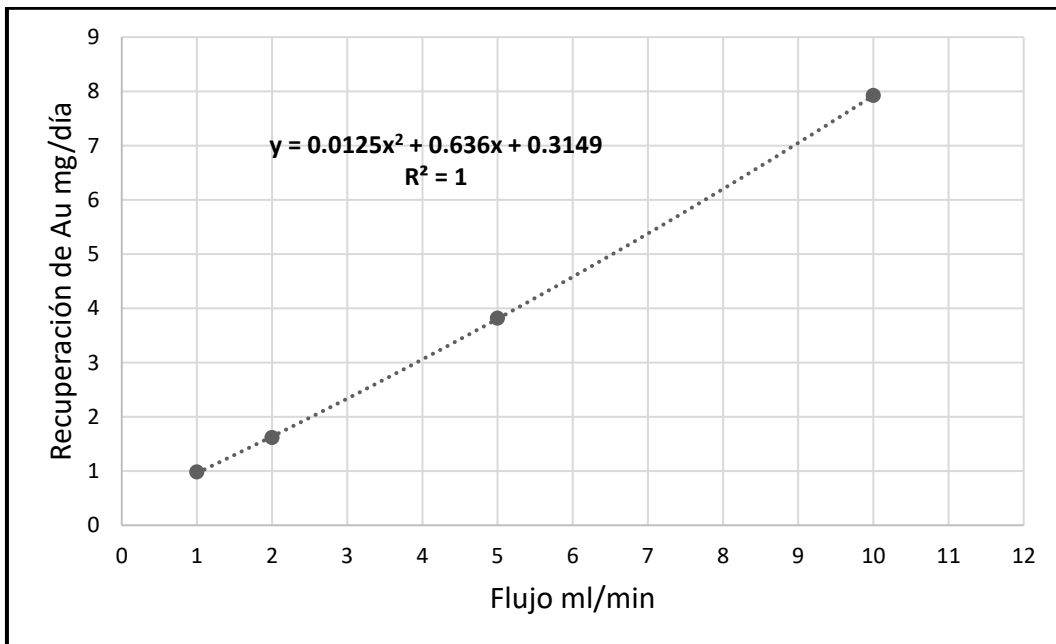


Figura 36. Gráfica de recuperación de Au en mg/día a diferentes flujos de entrada con carbón activado a una concentración de 300 ppm

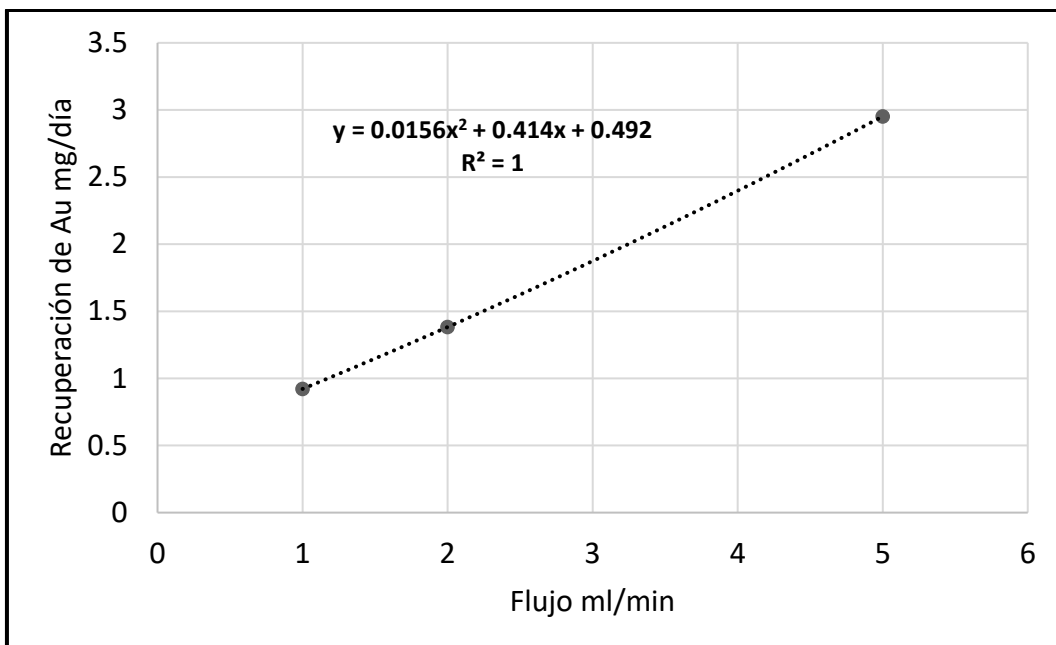


Figura 37. Gráfica de recuperación de Au en mg/día a diferentes flujos de entrada con carbón activado a una concentración de 100 ppm

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Como se muestra en la Tabla II, la solución en estudio tiene un contenido de oro y plata, estos se obtuvieron utilizando el equipo de absorción atómica, nos mostró un licor de $0.78 \frac{mg}{L}$ de oro y $0.01 \frac{mg}{L}$ de plata en Dezo.
- En base a los licores obtenidos el proceso adecuado para el tratamiento de las soluciones sigue siendo carbón activado, ya que no se presenta una cantidad significativa de plata, y no presenta nada de cobre.
- Las propiedades físicas de un carbón activado son un factor importante en el proceso de adsorción de oro, en términos de velocidad de adsorción y cantidad de oro adsorbido, siendo principalmente el área correspondiente a los poros la que influye en gran manera a la adsorción del complejo de oro.
- Las micrografías SEM del carbón activado original presenta una estructura de tipo cavernosa (Porosa), en la que están contenidos los diferentes tipos de poro, mientras que las micrografías del carbón activado cargado, presentan la disminución de los poros dando lugar a la adsorción del oro en los sitios disponibles.
- Las mayores capacidades de adsorción de oro se obtienen en medios ajustados con cal (CaO) grado comercial. En la microscopia del carbón cargado existe la presencia de cationes, como el Ca^{2+} , y la valencia de estos es un factor importante en la adsorción de oro.
- Se observó que el tiempo de saturación de la prueba que se realizó en NaCN con carbón activado a 100 ppm, fue de 72 horas, alcanzando un porcentaje de saturación del 94.33%, mientras que la prueba que se realizó con Dezo con carbón activado a 100 ppm y tiempo de 72 horas,

se obtuvo un porcentaje de saturación del 84.61%. Comparando estas 2 pruebas se observa que hay una diferencia del 10% menos de saturación con Dezo.

- En la prueba con Dezo en carbón activado a 300 ppm se obtiene una saturación más baja, siendo del 64.10%, pero con la ventaja de que se saturó a un tiempo de 24 horas.
- En cuanto a las isotermas de Freundlich y Langmuir, de acuerdo con las pruebas realizadas, se observó que el modelo que se ajustó más a las pruebas en condiciones de 300 ppm es Freundlich y Langmuir, pero el modelo que se ajusta de acuerdo a las características de adsorción es Freundlich, debido a que el parámetro de superficie de adsorción es $n < 1$, que predice las altas cargas adsorbentes en concentraciones bajas.
- Para los resultados de recuperación de oro en las pruebas de adsorción en las columnas de carbón activado, se hicieron comparaciones a diferentes concentraciones para la adsorción utilizando 100 ppm con Dezo y 300 ppm de Dezo, siendo más favorable la recuperación de oro en el carbón activado con 300 ppm de Dezo.
- Se puede observar que las recuperaciones son similares en flujos de 1 y $2 \frac{ml}{min}$ para ambas pruebas, pero se notan los cambios significativos hasta que el flujo de entrada fue de $5 \frac{ml}{min}$, aumentándose más la recuperación de oro en la prueba de carbón activado de 300 ppm, como se puede observar en la Tabla XVIII y XX, siendo esta la más favorable para las pruebas de adsorción de oro, tanto en laboratorio como posiblemente en la industria.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda seguir con la investigación de Dezo sobre carbón activado, investigando más en 3 variables, que más influyen en los resultados obtenidos en este trabajo, las cuales fueron la concentración de Dezo en carbón activado, la velocidad de flujo óptimo para operar y tener una buena recuperación de oro en el carbón activado y la cantidad de masa en carbón activado en las columnas de adsorción.

También se recomienda seguir investigando la adsorción, pero esta vez no en carbón activado, sino en resinas de intercambio iónico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Barsky, G. (1935). Dissolution of gold and silver in cyanide solutions. In G. S. Barsky. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng.
- [2] Checa, D. A. (2015). Desarrollo y caracterización de compósitos de carbón activado-vidrio para la recuperación de oro. *Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, 159.
- [3] Dezo. (2019). Dezo. Retrieved from <http://www.dezo.hk/>
- [4] Gómez, D. U. (2017). Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de contaminantes emergentes presentes en disoluciones acuosas. *Universitat Politècnica de València*, 13-14.
- [5] Habashi, F. (1987). *One hundred years of cyanidation*. Quebec City.
- [6] Hiskey, J. B. (1985). *Gold and silver extraction: The application of heap leaching cyanidation*. Tucson, Arizona: Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology.
- [7] Javier, L. T. (2020). Análisis Bibliográfico de tipos de isoterma de adsorción Freundlich, Langmuir Y Brunauer, Emmett, Teller en zeolita para la recuperación de suelos agrícolas de la provincia de Cotopaxi en el periodo 2020. *Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos*, 53.
- [8] Massey, A. G. (1975). *The Chemistry of Copper, Silver and Gold*. Pergamon Press.
- [9] Ruiz, E. M. (2005). *La Minería Mexicana, su evolución, retos y perspectivas*. México D.F.: Congreso Internacional de Derecho Comparado.
- [10] Syed, S. (2012). Recovery of gold from secondary sources—A review. In *Hidrometallurgy* (pp. 115-116, 30-31). Elsevier.
- [11] Torres, J. A. (2016). *Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados cianurados*. San Luis Potosí.
- [12] Torres, S. B. (2012). *Cianuración de minerales auríferos y adsorción de oro y plata con carbón activado inmovilizado*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- [13] U.D., S. (2011). *Manual del Carbón Activo*. Sevilla: Aula Aguapedia .
- [14] White, H. A. (1905). *The solubility of gold in thiosulfates and thiocyanates*.
Journal of the Chemical Metallurgical and Mining Society of South Africa.
- [15] Yannopoulos, J. C. (1991). *The Extractive Metallurgy of Gold*. New York:
Springer.