



APLICACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN  
DE ORO Y PLATA DE LA EMPRESA MINERA “LA BAJA” EN EL MUNICIPIO DE  
CALIFORNIA-SANTANDER

CLAUDIA LISSETH LEAL GÓMEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2010



APLICACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN  
DE ORO Y PLATA DE LA EMPRESA MINERA “LA BAJA” EN EL MUNICIPIO DE  
CALIFORNIA-SANTANDER

ESTUDIANTE

CLAUDIA LISSETH LEAL GÓMEZ

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO METALÚRGICO

DIRECTORA

Ph.D. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA

CODIRECTOR

ING. JUAN MANUEL PINZÓN

Ingeniero de la CDMB

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2010

## AGRADECIMIENTOS

La autora Claudia Lisseth Leal Gómez agradece a:

A la profesora Elcy María Córdoba, por su valiosa contribución en la dirección del proyecto, por su gran apoyo y ayuda durante todo el proyecto. Al Ingeniero Juan Manuel Pinzón, por su gran ayuda, su confianza y apoyo incondicional. A la CDMB por su colaboración en los prestamos de sus laboratorios. Al Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales por el apoyo económico para el proyecto. A la Universidad Industrial de Santander. A todos los técnicos especialmente Ambrosio que me brindo su ayuda y conocimiento y a todos los Profesores que contribuyeron en mi formación como ingeniero.

A Dios en primera instancia, por regalarme ésta vida maravillosa y permitir que haya culminado éste sendero que comencé a transitar hace algunos años.

A mis padres José y María Isabel, por tenerme tanta confianza y tanta paciencia, y por todo su apoyo, mil gracias les doy ya que gracias a ustedes dos pude lograr cumplir con mi sueño de ser profesional, además mil gracias por todo el amor que nos han brindado a mis hijas y a mí.

A mis dos hijas María Paula y Valentina por que han sido el motivo de seguir adelante y ser cada día mejor y son mis dos amores que día a día me hacen sonreír con sus travesuras, por ellas di lo mejor para poder ofrecerles un buen futuro.

A mis hermanos José Luis y Julian por su ejemplo y ganas de salir adelante y por todo el cariño que siempre me han brindado.

A toda mi familia por su ayuda en aquellos momentos en que los necesite y por siempre darme un impulso para salir adelante y cumplir con todas mis metas.

Y mil gracias a todas las personas que de alguna forma estuvieron apoyándome para poder lograr cumplir con este reto de ser profesional.

A todos los quiero mucho, mil gracias y que Dios los bendiga.

# CONTENIDO

CONTENIDO .....	7
LISTA DE TABLAS .....	10
LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE ANEXOS .....	13
INTRODUCCIÓN .....	16
1. OBJETIVOS .....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	18
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	19
3. MARCO TEORICO .....	22
3.1 CIANURACIÓN DE MINERALES DE ORO.....	22
3.1.1 Generalidades .....	22
3.1.2 Efecto de las principales variables sobre la cianuración. ....	23
3.1.2.1 Tamaño de partícula. ....	23
3.1.2.2 Concentración de cianuro. ....	24
3.1.2.3 Concentración de oxígeno. ....	24
3.1.2.4 pH.....	24
3.1.2.5 Temperatura. ....	25
3.1.2.6 Velocidad de Agitación. ....	26
3.2 RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA DESDE SOLUCION CIANURADAS ....	26
3.2.1 Precipitación Utilizando Zinc: .....	26
3.2.2 Adsorción con Carbón Activado: .....	27
3.2.2.1 Características generales del carbón activado.....	27
3.2.2.2 Técnicas de adsorción. ....	28
3.2.2.3 Efecto de las variables más importantes del proceso de adsorción de Au y Ag con carbón activado .....	32
3.2.2.4 Desorción del oro del carbón activado .....	34

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	37
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS (MINERAL Y CARBÓN ACTIVADO) .....	38
4.1.1 Mineral.....	38
4.1.2 Carbón Activado .....	39
4.2 PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS .....	40
4.2.1 Preparación del mineral .....	40
4.2.2 Preparación del Carbón Activado.....	40
4.3 PRUEBAS DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN .....	41
4.4 ENSAYOS DE ADSORCIÓN DE ORO Y PLATA CON CARBÓN ACTIVADO	42
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	44
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	44
5.1.1 Mineral.....	44
5.1.2 Carbón.....	49
5.2 ENSAYOS DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN .....	55
5.2.1 Efecto del pH sobre la disolución de oro y plata.....	55
5.2.2 Efecto del porcentaje de sólidos y de la concentración de cianuro en la cianuración del mineral .....	58
5.2.3 Efecto del tiempo sobre la cianuración del mineral .....	62
5.2.4 Caracterización de los residuos sólidos (colas) de cianuración.....	63
5.3 ESTUDIO DE ADSORCIÓN DE ORO Y PLATA CON CARBÓN ACTIVADO .	67
5.3.1 Efecto de la velocidad de agitación en la adsorción de oro y plata.....	67
5.3.2 Efecto de la granulometría del carbón y de la relación carbón/solución en la adsorción de oro y plata.....	69
5.3.3 Efecto del tiempo en la adsorción de oro y plata sobre el carbón activado ..	79
5.3.4 Caracterización del carbón cargado con metales preciosos.....	80
5.3.5 Balance de materia para los procesos de cianuración y adsorción de oro y plata en una sola etapa.....	86
6. CONCLUSIONES .....	87
7. RECOMENDACIONES.....	89

8. BIBLIOGRAFÍA.....	90
9. ANEXOS.....	93

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables evaluadas en las pruebas de cianuración por agitación.....	42
Tabla 2. Variables evaluadas en las pruebas con carbón activado. ....	43
Tabla 3. Tenores de Au y Ag en el mineral. ....	44
Tabla 4. Análisis por Fluorescencia de Rayos X del mineral .....	45
Tabla 5. Análisis próximo del carbón. ....	49
Tabla 6. Área superficial específica de las fracciones granulométricas del carbón....	53
Tabla 7. Condiciones operacionales del efecto del pH en la cianuración. ....	55
Tabla 8. Condiciones operacionales para el estudio de las variables % sólidos y concentración de cianuro. ....	58
Tabla 9. Condiciones operacionales de la cinética de disolución. ....	62
Tabla 10. Análisis por FRX de las colas de cianuración. ....	66
Tabla 11. Condiciones operacionales del estudio de la velocidad de agitación.....	67
Tabla 12. Condiciones operacionales para el estudio de la granulometría del carbón y relación carbón/solución. ....	69
Tabla 13. Constantes cinéticas de pseudo-primer orden para el estudio de adsorción de Au y Ag. ....	76
Tabla 14. Condiciones operacionales para el estudio del efecto del tiempo en la adsorción de Au y Ag.....	79

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Diagrama del proceso actual de la planta La Baja .....	19
FIGURA 2. Diagrama Eh-pH del Au-H <sub>2</sub> O-CN <sup>-</sup> .....	25
FIGURA 3. Esquema de la operación del método CIP.....	30
FIGURA 4. Esquema de la operación del método CIL. ....	31
FIGURA 5. Esquema de la operación del método CIC.....	32
FIGURA 6. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del proyecto. ....	37
FIGURA 7. Montaje utilizado en los ensayos de cianuración. ....	41
FIGURA 8. Micrografía SEM del mineral (500x).....	46
FIGURA 9. Mapeo de elementos presentes en la porción de mineral mostrado en la figura 8.....	47
FIGURA 10. Difractograma del mineral.....	48
FIGURA 11. Distribución granulométrica del mineral. ....	49
FIGURA 12. Micrografía SEM (500x) del carbón activado. ....	50
FIGURA 13. Mapeo de los elementos presentes en la porción de carbón mostrado en la figura 12. ....	51
FIGURA 14. Distribución granulométrica del carbón activado original.....	52
FIGURA 15. Distribución granulométrica de las fracciones de carbón empleado. ....	52
FIGURA 16. Isotermas de adsorción de las fracciones granulométricas de carbón. ....	54
FIGURA 17. Distribución de tamaño de poros en las muestras de carbón. ....	55
FIGURA 18(a, b) Efecto del pH en la cianuración del mineral. ....	56
FIGURA 19. Curva de especiación del cianuro. ....	57
FIGURA 20. Efecto de la concentración de cianuro y del % de sólidos en la disolución de oro.....	58
FIGURA 21. Efecto de la concentración de cianuro y del % sólidos en la disolución de plata.....	60
FIGURA 22. Curvas cinéticas de disolución de oro y plata. ....	62

FIGURA 23. Difractograma de las colas de cianuración. ....	64
FIGURA 24. Micrografía SEM (500X) de las colas de cianuración. ....	65
FIGURA 25. Mapeo de elementos presentes en las colas de cianuración. ....	65
FIGURA 26. Curvas cinéticas de adsorción de oro para diferentes valores de agitación. ....	68
FIGURA 27. Curvas cinéticas de adsorción de plata para diferentes valores de agitación. ....	68
FIGURA 28. Curvas cinéticas de adsorción de oro para diferentes condiciones de granulometría del carbón y relación carbón/solución. ....	70
FIGURA 29. Curvas cinéticas de adsorción de plata para diferentes condiciones de granulometría del carbón y relación carbón/solución. ....	71
FIGURA 30. Linealización de las cinéticas de adsorción de oro. ....	73
FIGURA 31. Linealización de las cinéticas de adsorción de plata. ....	75
FIGURA 32. Diagrama de pareto para Au. ....	77
FIGURA 33. Gráfica de efectos principales para $K_{Au}$ . ....	77
FIGURA 34. Diagrama de pareto para el Ag. ....	78
FIGURA 35. Gráfica de efectos principales para $K_{Ag}$ . ....	78
FIGURA 36. Cinéticas de adsorción de Au y Ag durante 48 horas. ....	80
FIGURA 37. Micrografías SEM y Espectros EDS de las muestras del carbón antes y después de la adsorción de oro y plata. ....	82
FIGURA 38. Mapeo elemental por EDS del carbón luego del proceso de adsorción de oro y plata. ....	84
FIGURA 39. Variación con el tiempo de las moles de metales adsorbidos. ....	85
FIGURA 40. Balance de materia para los procesos de cianuración y adsorción de oro y plata. ....	86
FIGURA 41. Clasificación BDDT de isothermas de adsorción. ....	97

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ATAQUE QUIMICO CON AGUA REGIA .....	93
ANEXO B. ENSAYO AL FUEGO .....	94
ANEXO C. MÉTODO VOLUMÉTRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE CIANURO LIBRE .....	96
ANEXO D. ISOTERMAS DE ADSORCION .....	97

# RESUMEN

**TITULO:** APLICACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ORO Y PLATA DE LA EMPRESA MINERA “LA BAJA” EN EL MUNICIPIO DE CALIFORNIA-SANTANDER<sup>1</sup>

**AUTOR:** CLAUDIA LISSETH LEAL GÓMEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Carbón Activado, Cianuración por agitación, Carbón en Pulpa, extracción de oro y plata, Adsorción, Proceso CIP.

## DESCRIPCIÓN

Actualmente, en la empresa minera La Baja, del municipio de California- Santander, los metales disueltos mediante cianuración por percolación se recuperan a través del proceso de precipitación con zinc, teniéndose la dificultad de que durante la filtración de la pulpa proveniente de cianuración se pierde cerca del 20% de la solución rica relacionada con la elevada humedad que presentan los lodos la cual puede ser del 50 al 60%. Ocasionándose pérdidas económicas importantes y, sobre todo, gran contaminación ambiental por el cianuro presente en tales soluciones. Teniendo en cuenta que el método de Carbón en Pulpa (CIP) no requiere de filtración para la adsorción de los metales disueltos, se propuso como objetivo principal del presente Trabajo de Grado determinar la viabilidad técnica de implementar en tal empresa, los procesos extractivos de cianuración por agitación y adsorción de oro y plata con carbón activado.

Para tal fin se trabajó con las colas de concentración gravimétrica, la cuales contienen cerca de 15.75 g Au/Ton mineral y 165.75 g Ag/Ton mineral. Con ellas se realizaron pruebas de cianuración por agitación y de adsorción con carbón activado, evaluándose los efectos de diferentes variables tales como concentración de cianuro, pH, porcentaje de sólidos, velocidad de agitación, granulometría del carbón, relación cantidad de carbón/volumen de solución, con el fin de determinar las mejores condiciones de disolución y adsorción de oro y plata.

Los resultados del estudio demuestran que, implementando tales procesos, se puede alcanzar la disolución del 90.38% de Au y 76.28% de Ag desde el mineral, así como la recuperación con carbón activado del 93 y 70% del oro y la plata disueltos. Concluyéndose que la implementación de tales procesos es viable desde un punto de vista técnico. No obstante, se recomienda evaluar el proceso de adsorción en múltiples etapas con miras a maximizar la recuperación de los metales disueltos.

---

<sup>1</sup> Trabajo de investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Programa de Ingeniería Metalúrgica, Directora PhD. Elcy María Córdoba Tuta, Codirector Ing. Juan Manuel Pinzón (CDMB).

## ABSTRACT

**TITLE:** APPLICATION OF ACTIVATED COAL IN THE PROCESS OF GOLD AND SILVER EXTRACTION OF “LA BAJA” COMPANY IN THE MUNICIPALITY OF CALIFORNIA – SANTANDER\*

**AUTHOR:** CLAUDIA LISSETH LEAL GÓMEZ\*\*

**KEYWORDS:** Activated coal, Cyanidation by agitation, Coal in pulp, gold and silver extraction, Adsorption, CIP process.

### DESCRIPTION

The mining company La Baja, in the municipality of California-Santander, currently recovers the metals dissolved by cyanidation by percolation using the process of precipitation with zinc. This process represents a difficulty since during the process of pulp filtering coming from cyanidation, there is a loss of about 20% of the rich solution related to the humidity present in mud, that may be of about 50-60% causing significant economic losses and above all, high environmental damage due to the presence of cyanide in such solutions. Taking into account that the method of coal in pulp (CIP) does not require filtration for the adsorption of the dissolved metals, it was propounded as main purpose of this Project to determine the technical viability of the implementation of extractive processes of cyanidation by agitation and adsorption of gold and silver with activated coal.

For that purpose, gravimetric concentration colas were used those which have about 15.75 g Au/Ton mineral and 165.75 g Ag/Ton mineral. Tests of cyanidation by agitation and adsorption with activated coal were made, evaluating the effects of different variables such as cyanide concentration, pH, solids percentage, agitation speed, coal granulometry, relation coal quantity/volume of solution, so that the best conditions for gold and silver dissolution and adsorption could be determined.

The results of the study show that implementing those processes, it is possible to reach dissolution of del 90.38 of Au and 76.28% of Ag from the mineral, as well as the recovering with activated coal of 93 and 70% of dissolved gold and silver; this leads to conclude that the implementation of this processes is feasible from a technical viewpoint. Nevertheless, it is recommended to evaluate the adsorption process at multiple stages in order to maximize the recovering of dissolved metals.

---

\* Research Work.

\*\* Physiochemical Engineering Faculty, Metallurgical Engineering Program, Director PhD. Elcy María Córdoba, Co-Director Ing. Juan Manuel Pinzón.

## INTRODUCCIÓN

En los procesos extractivos de oro y plata, desde sus minerales, de la zona minera de Vetas y California (Santander) se utilizan reactivos tóxicos como mercurio y cianuro, los cuales causan gran impacto ambiental en el recurso hídrico del río Suratá por el vertimiento de los residuos mineros a las fuentes hídricas de la región.

Con el apoyo del Gobierno Alemán, a través del Instituto Federal de Geociencias y Recursos naturales de Alemania (BGR por sus siglas en Alemán) y la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB se han introducido sistemas de concentración gravimétrica y métodos de cianuración por agitación que han reducido notablemente los consumos de cianuro y mercurio en las empresas mineras.

La cianuración por agitación fue implementada en los municipios citados desde el año 2004, propagándose en forma masiva especialmente por las bondades económicas del método y por la rapidez con la cual se recupera el oro fino asociado a los minerales pesados presentes en los concentrados gravimétricos.

El sistema de cianuración por agitación se ha venido desarrollando en operación batch, utilizando tanques cilíndricos con capacidad entre 1 y 2 toneladas por lote, en los cuales la pulpa es accionada por sistemas mecánicos. La pulpa tiene normalmente un porcentaje de sólidos entre 30 y 40 % , el tiempo de agitación es de 24 horas y la concentración de cianuro de sodio utilizada se encuentra en el rango 3,0 a 4,0 g/L. La separación de la solución cargada con oro se realiza mediante filtración en lechos de arena (esta arena es el producto de la molienda del mineral y lo que se obtiene en la mesa concentradora como medios de mesa), para finalmente efectuar la recuperación del oro disuelto en la solución de cianuro mediante la

utilización de zinc en viruta. El cemento portador de los metales preciosos se somete a fundición en hornos tubulares para separar el oro y la plata.

Aunque el sistema de cianuración por agitación permitió mejorar ostensiblemente la disolución del oro, alcanzando valores entre 80 y 90% dependiendo de la granulometría del mineral, actualmente existen fuertes pérdidas de cianuro y oro asociadas con la humectación del mineral, dado que para la precipitación del oro con zinc se requiere la filtración de la solución rica y en esta etapa los sólidos retienen una cantidad importante de dicha solución.

Teniendo en cuenta lo anterior, con el presente proyecto se pretende identificar un método sencillo y económicamente viable para la implementación del proceso de Carbón en Pulpa (CIP) en la zona minera de Vetas y California, con el fin de aumentar la tecnificación del proceso extractivo y mejorar la recuperación de oro.

Considerando el interés presentado por la empresa minera "LA BAJA", se determinó la conveniencia de desarrollar el estudio con el mineral de esta empresa, la cual desarrolla sus actividades mineras en el municipio de California-Santander.

# 1. OBJETIVOS

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la viabilidad técnica de la utilización del carbón activado en la cianuración por agitación de minerales auroargentíferos de la sociedad minera “La Baja” del municipio de California, mediante la técnica de carbón en pulpa (CIP).

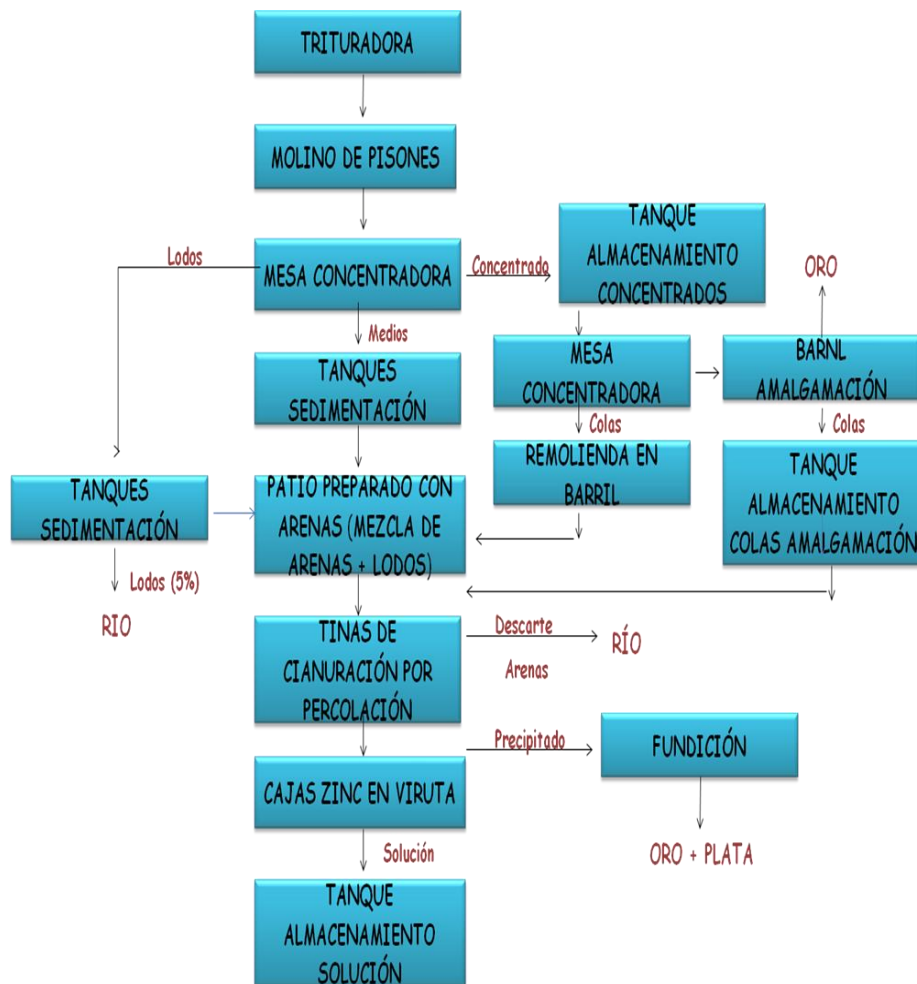
## 1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar las condiciones operacionales más adecuadas para llevar a cabo el proceso de cianuración por agitación de la mina “La Baja”, mediante pruebas de laboratorio.
- Determinar a través de pruebas de laboratorio las mejores condiciones para la aplicación del método de carbón en pulpa, CIP, para la recuperación del oro y la plata disueltos por cianuración del mineral de la mina “La Baja”.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las operaciones básicas efectuadas en la planta de la empresa minera La Baja del municipio de California son conminución, concentración gravimétrica, amalgamación de una pequeña fracción de los concentrados gravimétricos, lixiviación por percolación del oro fino utilizando cianuro de sodio, precipitación de los metales preciosos con zinc y la fundición de tal precipitado (ver figura 1).

FIGURA 1. Diagrama del proceso actual de la planta La Baja



Fuente: Ingeniero Juan Manuel Pinzón CDMB

La planta, en promedio, procesa 220 toneladas de mineral al mes, de las cuales retiene aproximadamente el 95% de la carga y, debido a las limitaciones de la planta de cianuración por percolación, solo puede procesar 160 toneladas por mes, razón por la cual siempre existe un excedente de mineral, el cual a final de año, cuando no opera el molino, se someten a cianuración por percolación.

La caracterización del mineral de estudio <sup>2</sup> (Lodos obtenidos de los tanques de sedimentación), permite identificar que aproximadamente el 40% de la carga molida está constituida por partículas finas con tamaños cercanos al 80% pasante en la malla 63 Tyler y, como especial característica, presenta elevados tenores de oro y plata (aproximadamente 15.75 g Au/Ton mineral y 165.75 g Ag/Ton mineral).

Estas características ponen de manifiesto la importancia de efectuar un procesamiento adecuado de los lodos, dado que la alternativa de procesarlos en la cianuración por agitación seguida de la precipitación con zinc presenta grandes limitantes ambientales y económicas.

Aunque a través de la cianuración por agitación se podría lograr una disolución eficiente del oro presente en los lodos, la limitante se presenta en la separación de la solución rica de los sólidos, lo cual es imprescindible para la etapa siguiente de precipitación de los metales con zinc. Las características de la pequeña minería y, sobre todo, las elevadas pendientes de la zona de trabajo no permiten acondicionar diques de colas, en las cuales recuperar la solución rica.

Experiencias realizadas por la CDMB, han identificado que la humedad de los lodos en sistemas de filtración con lechos de arena puede llegar hasta el 60%, condición que revela la afectación económica y ambiental de este sistema.

---

<sup>2</sup> Información de los resultados obtenidos de la distribución del mineral y ensayo al fuego.

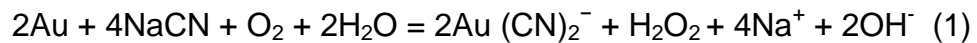
Actualmente la Sociedad Minera La Baja está construyendo y adecuando dos tanques de agitación de diámetro 2.50 m y altura 4.50 m, en los cuales se desea implementar los procesos de cianuración por agitación y de adsorción de oro y plata con carbón activado. A la fecha la infraestructura se encuentra desarrollada en un 80% y están pendientes algunos trabajos para la conducción de pulpas a las tinajas de filtración. Por tanto, con esta investigación se espera demostrar la viabilidad técnica de la implantación de tales procesos en la planta, así como identificar las condiciones operacionales más adecuadas para el funcionamiento de los mismos. Partiendo de los resultados de este proyecto (a escala de laboratorio), la empresa realizara pruebas pilotos en sus instalaciones para ajustar los parámetros operacionales.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1 CIANURACIÓN DE MINERALES DE ORO.

##### 3.1.1 Generalidades [1][2]

En la mayoría de los minerales de oro, este elemento se encuentra en forma metálica y debe ser oxidado durante el proceso de disolución. Las reacciones que tienen lugar durante la disolución del oro en las soluciones de cianuro, ya han sido establecidas. La mayoría de las autoridades en la materia concuerdan en que la ecuación global de la disolución de oro es la siguiente.



El oxígeno se suministra a través del aire y a la vez sirve para agitar la pulpa. El cianuro se adiciona como cianuro de sodio y la cal se utiliza para controlar la alcalinidad. En un sistema relativamente simple de este tipo, el oro se disuelve con facilidad y las únicas condiciones que se requieren son: que el oro esté libre y limpio; que la solución de cianuro no contenga impurezas que puedan inhibir la reacción y que se mantenga un adecuado abastecimiento de oxígeno a la solución durante todo el proceso de la reacción.

La disolución de oro, puede verse afectada negativamente por cianicidas (minerales de cobre, sulfuros de arsénico y antimonio, sulfuros de otros metales, azufre y minerales arcillosos), que no solo disminuyen la concentración de cianuro disponible para la lixiviación sino que además pueden inhibir el proceso. Un ejemplo de ello son los minerales refractarios de oro, los cuales presentan un variado conjunto de

problemas químicos, los cuales dificultan la aplicación de la lixiviación por cianuración como método efectivo en la extracción del oro.

La cianuración de oro está regida por procesos físicos de difusión con varias etapas; entre ellas: Disolución de cianuro y oxígeno, transporte de estos reactivos a la superficie de mineral, adsorción del cianuro y oxígeno, la reacción electroquímica y la formación del complejo cianurado y, al final, la desorción y transporte de este complejo a la solución.

### **3.1.2 Efecto de las principales variables sobre la cianuración.**

El proceso de lixiviación de minerales, a través de un reactivo químico, está influenciado por una gran cantidad de variables, que muchas veces dificultan su control. Entre los principales factores que influyen el proceso de cianuración de minerales de oro se tiene, tamaño de partícula, concentración de cianuro, agitación, alcalinidad, concentración de oxígeno, temperatura, agentes reductores, etc.

#### **3.1.2.1 Tamaño de partícula.**

La velocidad de disolución es directamente proporcional al área superficial expuesta del oro. El área superficial expuesta está relacionada con la distribución del tamaño de partícula y las características de liberación del material alimentado, y está afectada por la eficiencia en el proceso de conminución que precede la lixiviación.

La disolución generalmente aumenta con el decrecimiento del tamaño de partícula, debido al incremento en la liberación del oro y/o del área superficial expuesta. Sin embargo, este no siempre es el caso y la velocidad de disolución del oro en minerales que contienen cianocidos puede disminuir con el decrecimiento del tamaño de partícula, debido al incremento en la velocidad de consumo de cianuro por parte de los cianocidos. En tales casos, el tamaño de partícula óptimo requiere de un compromiso entre la extracción del oro y el consumo de cianuro.

### **3.1.2.2 Concentración de cianuro.**

La concentración óptima de la solución de cianuro depende de las características de la mena y se debe determinar experimentalmente. La concentración de cianuro a nivel industrial varía entre 0.5 y 1.5 kg/ton NaCN.

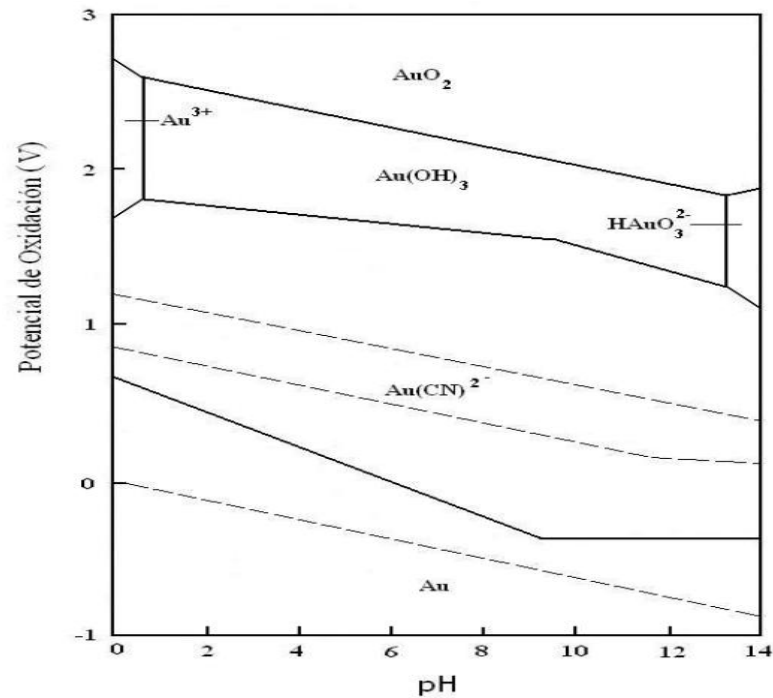
### **3.1.2.3 Concentración de oxígeno.**

El uso de oxígeno, o un agente oxidante, es esencial para la disolución del oro bajo condiciones normales de cianuración. Para este propósito, suele utilizarse el oxígeno absorbido por las soluciones circulante y agitada, y muchas veces introducido como adición en los tanques de agitación. Sin la presencia de oxígeno disuelto en la pulpa no es factible que ocurra la disolución del oro, por lo tanto es un parámetro muy importante a tener en cuenta durante el control del proceso.

### **3.1.2.4 pH.**

El diagrama Eh-pH para el sistema oro-cianuro-H<sub>2</sub>O (figura 2) indica que la fuerza electroquímica que conduce la disolución es maximizada cuando el valor de pH se encuentra entre 9.0 y 9.5 aproximadamente, sin embargo, es conveniente trabajar a valores de pH elevados (10, 11) para evitar la volatilización y generación de HCN, lo cual es favorecido a valores de pH menores de 8. Al respecto, algunos investigadores (Marsden y House, 1993) [3], han determinado que la velocidad de disolución disminuye rápidamente con la adición de cal cuando se está cerca de pH = 11, llegando a ser casi nula a pH cercano a 12.

FIGURA 2. Diagrama Eh-pH del Au-H<sub>2</sub>O-CN<sup>-</sup>.



Fuente: Marsden y House, 1993.

### 3.1.2.5 Temperatura.

Cuando se aplica calor a una solución de cianuro que contiene oro, dos factores opuestos influyen en la velocidad de disolución. El aumento de la temperatura agiliza la actividad de la solución y consiguientemente acelera la velocidad de disolución. Al mismo tiempo, la cantidad de oxígeno en la solución disminuye porque la solubilidad de los gases decrece con el aumento de la temperatura. Por tales motivos la velocidad de disolución del oro se incrementa con la temperatura hasta un máximo de 85° C, ya que a partir de esta temperatura el descenso en la solubilidad del oxígeno comienza a contrarrestar los beneficios del incremento de la actividad iónica [4][5].

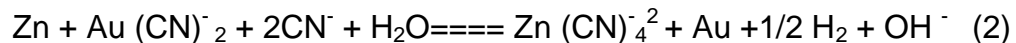
### **3.1.2.6 Velocidad de Agitación.**

La disolución de oro es usualmente controlada por el transporte de masa dentro de las condiciones normalmente aplicadas para la lixiviación por cianuración. El incremento en la agitación incrementa la velocidad de disolución hasta un máximo, a partir del cual la agitación tiene poco o ningún beneficio sobre la disolución.

## **3.2 RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA DESDE SOLUCIONES CIANURADAS**

### **3.2.1 Precipitación Utilizando Zinc:**

El principio de la precipitación con Zinc de metales preciosos contenidos en soluciones cianuradas, está basado en el hecho de que el oro y la plata son electronegativos respecto al zinc, ocurriendo un reemplazo electroquímico del oro y la plata por el zinc, seguido por el desplazamiento del hidrógeno del agua por el sodio según la siguiente reacción:



Para lograr una buena precipitación es necesario mantener ciertas condiciones como: control químico, des-aireación, debe existir una cantidad suficiente de cianuro y cal libre para disolver el Zinc y mantener en la solución los compuestos formados.

Un exceso de cianuro provoca un consumo elevado de Zinc y un exceso de cal tiende a retrasar la precipitación, para evitar esta situación se debe añadir acetato de plomo para acelerar la precipitación del oro (este precipita en el zinc en forma de película metálica, creando así un par galvánico, que da lugar a una precipitación más rápida del oro y menor consumo de Zinc).

### **3.2.2 Adsorción con Carbón Activado:**

En el proceso de adsorción con carbón activado los átomos en la superficie del carbón atraen y retienen moléculas de compuestos e iones que contienen el oro.

#### **3.2.2.1 Características generales del carbón activado**

El carbón activado se caracteriza por ser un material que tiene una gran superficie específica, propiedad que le confiere una gran capacidad para retener, en su superficie, compuestos de interés o elementos indeseables contenidos en diversos sistemas: líquidos o gaseosos. El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito, es extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de  $1.500 \text{ m}^2$  o más por gramo de carbón. El tamaño de los poros varía desde  $3 \text{ \AA}$  a varios miles de  $\text{\AA}$ .

#### **El Proceso de Activación**

El Carbón activado puede fabricarse a partir de todo tipo de material carbonoso, o bien, a partir de cualquier carbón mineral no grafitico. Sin embargo, cada materia prima le da características y calidades distintas al producto. Existen dos métodos de activación: activación térmica y por deshidratación química.

##### **A) Activación térmica:**

Para su obtención se parte de un material orgánico (madera, cáscara de coco, etc), el proceso se inicia con su carbonización, la cual debe realizarse a una baja temperatura ( $400^\circ\text{C}$ ), para que no se favorezca la grafitación. Si se parte de carbón mineral, no se requiere la carbonización, ya que ésta la realiza la misma naturaleza. Sin embargo, en el caso de los carbones minerales suele ser necesario un lavado previo, para extraer contaminantes como azufre y metales pesados, que están presentes en los yacimientos.

B) Activación por deshidratación química:

Este método solo puede aplicarse a ciertos materiales orgánicos, relativamente blandos y que están formados por moléculas de celulosa, como es el caso de la madera. La primera etapa consiste en deshidratar la materia prima mediante la acción de un químico, que puede ser ácido fosfórico, cloruro de zinc o carbonato de potasio. Posteriormente, se carboniza el material deshidratado a baja temperatura (500 a 600°C), obteniéndose automáticamente la estructura porosa deseada.

### **3.2.2.2 Técnicas de adsorción [6][7].**

La tecnología del uso del carbón activado comprende tres técnicas de aplicación, que son: Carbón en pulpa (CIP), Carbón en columna (CIC) y Carbón en lixiviación (CIL).

La técnica de adsorción a aplicar depende del tipo de cianuración:

- CIC: Aplicable a soluciones claras salientes de lixiviación por percolación en bateas o pilas, normalmente en varias etapas y en contracorriente.
- CIP: Aplicable a pulpas provenientes de cianuración por agitación. La solución se trata sin separación sólido – líquido, generalmente en tanques separados, en varias etapas y en contracorriente.
- CIL: Consiste en adsorber el oro en el carbón durante la lixiviación. El movimiento del carbón es en contracorriente.

## **CARBÓN EN PULPA (CIP):**

Es generalmente usado en el tratamiento de menas de oro de bajo grado, aunque también puede ser usado en concentrados. Las menas son molidas en un molino de bolas en una operación en circuito cerrado con un ciclón, para obtener un producto de tamaño adecuado para la lixiviación. La pulpa es acondicionada con cal y aire por varias etapas de lixiviación. En cada tanque la cal, el cianuro de sodio y aire de la planta son vigorosamente mezclados mecánicamente, dentro de la pulpa, con el objeto de lograr la disolución del oro.

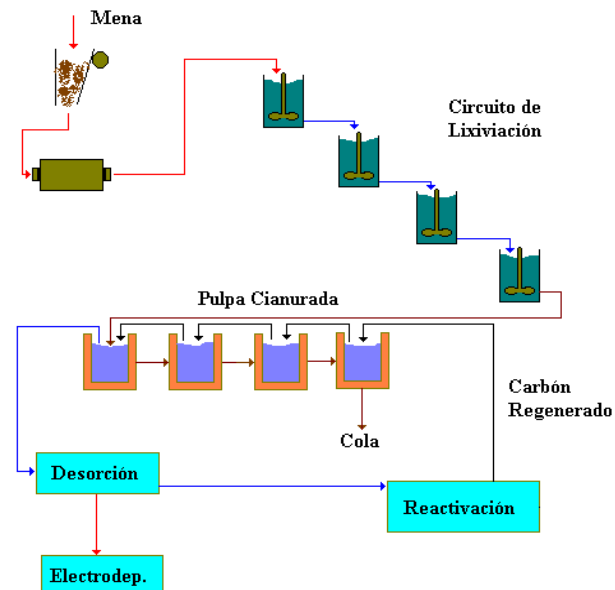
La pulpa fluye del circuito de lixiviación hacia el circuito CIP que consta de tres o más tanques lixiviantes (figura 3), dentro de los cuales se adiciona carbón activado, cal, cianuro de sodio y aire de la planta, aunque el cianuro es omitido en el último tanque para reducir el contenido de cianuro libre en la pulpa antes de la descarga. El circuito CIP opera en contracorriente, es decir que el carbón activado fluye en diferente dirección que la pulpa lixiviada.

Mientras el carbón avanza por el circuito, éste adsorbe los complejos auríferos y argentíferos y luego es enviado al circuito de desorción. La pulpa estéril es cribada y dispuesta como colas, el agua de las colas es reutilizada.

El carbón activado cargado con cianuro de oro y plata es transportado a los tanques de desorción en donde una solución caliente de  $\text{NaCN} - \text{NaOH}$  es usada para lavar los metales preciosos, la solución rica es bombeada a las celdas de electrodeposición, donde el oro y la plata son tratados sobre cátodos de lana de acero y posteriormente, el cátodo es removido para fusión.

El carbón despojado de los metales preciosos es enviado a un horno de regeneración para reactivar su superficie, después mezclado con carbón nuevo, cribado y luego retornando al circuito CIP.

FIGURA 3. Esquema de la operación del método CIP.



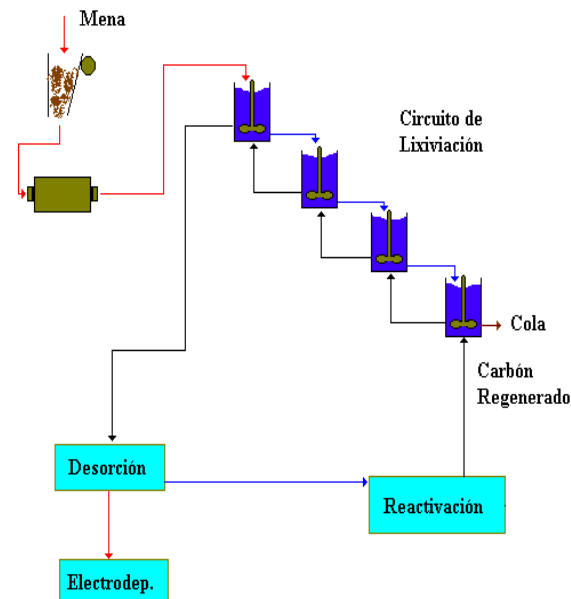
Fuente: M. Sc Mario Gaete M. Capacitación minera a periodistas de la región de Coquimbo.

### **CARBÓN EN LIXIVIACIÓN (CIL):**

En este proceso (figura 4), el carbón activado se adiciona a la pulpa en los tanques de lixiviación, permitiendo la adsorción del oro y de la plata desde la solución a medida que ocurre la cianuración, El avance del carbón se hace en contracorriente con la pulpa, de manera similar al CIP, empleando dos tanques de agitación e inyección de aire.

Durante el proceso se debe acondicionar el pH (10 – 11) y ajustar la concentración de cianuro. Normalmente, tiempo de residencia de la pulpa en esta etapa es de 8 horas, después del cual el carbón es separado por medio de una criba y llevado al circuito de recuperación.

FIGURA 4. Esquema de la operación del método CIL.



Fuente: M. Sc Mario Gaete M. Capacitación minera a periodistas de la región de Coquimbo.

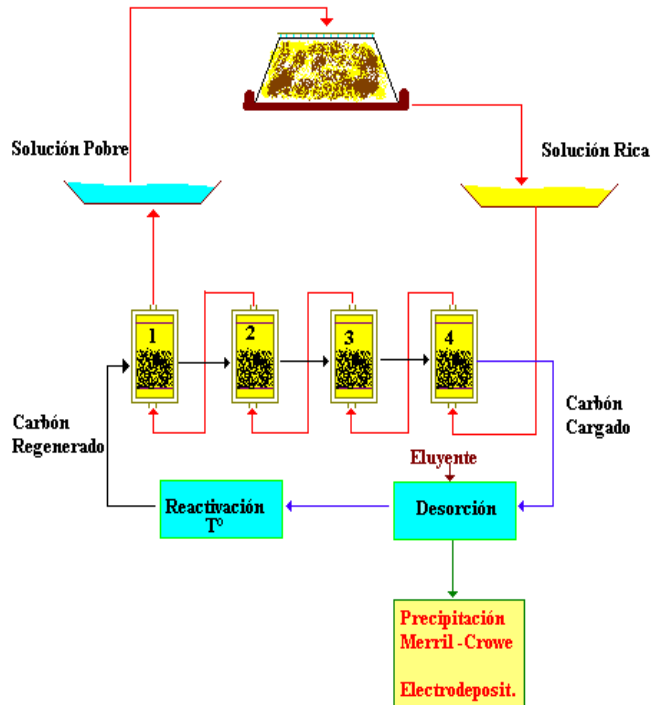
### **CARBÓN EN COLUMNA (CIC):**

En este método se hacen pasar las soluciones que se percolan de las pilas de lixiviación por varias columnas, éstas en su interior contienen el carbón activado. Las columnas que están en contacto con las soluciones cianuradas son periódicamente rotadas para tener un mayor aprovechamiento de la capacidad de adsorción del carbón.

La alimentación de las columnas se realiza en contracorriente, lo que mantiene las partículas de carbón en suspensión evitando que el lecho se compacte. La primera columna que se contacta con la solución es retirada periódicamente y se rotan las restantes, agregándose al final una nueva columna con carbón descargado. El oro adsorbido sobre el carbón activado es extraído del mismo, mediante una solución

alcalina de sulfato de sodio o una solución cianurada en caliente. El oro que contiene esta última solución cianurada se puede recuperar mediante electrolisis.

FIGURA 5. Esquema de la operación del método CIC.



Fuente: M. Sc Mario Gaete M. Capacitación minera a periodistas de la región de Coquimbo.

### 3.2.2.3 Efecto de las variables más importantes del proceso de adsorción de Au y Ag con carbón activado

- **Granulometría del carbón**

La granulometría del carbón debe ser tal que no contenga un exceso de gruesos (> 3 mm), para evitar problemas en la agitación (embancamiento y aumento de la potencia del agitador). También se debe evitar el exceso de finos, los cuales dificultan la separación del carbón cargado con los metales del mineral (procesos CIP y CIL). Por tanto, se recomienda que menos del 40% del carbón tenga un tamaño inferior a 75 $\mu$ m.

- **Velocidad de Agitación**

La velocidad de agitación debe ser lo suficientemente alta 300 r.p.m para mantener los sólidos en suspensión, así como para acelerar la cinética de la reacción, debido a que se disminuye la resistencia a los fenómenos difusionales. Una velocidad de agitación demasiado alta fractura el carbón, produciéndose pérdidas de carbón fijo cargado en las colas.

- **Porcentaje de sólidos (mineral)**

El porcentaje de sólidos debe ser, en la mayoría de los casos, lo más alto posible para alcanzar una alta concentración del ion metálico en la solución de lixiviación, minimizar los costos de inversión en el circuito de lixiviación por menor capacidad volumétrica y reducir el tamaño y costo subsecuente de espesamiento y filtración. El porcentaje de sólidos en la pulpa varía entre 20 y 50%.

La velocidad de adsorción de cianuro de oro decrece con el incremento de la densidad de pulpa. Este efecto es atribuido al decrecimiento de la eficiencia de mezclado que resulta del incremento de la viscosidad.

- **Temperatura**

La velocidad de adsorción se incrementa ligeramente con el incremento de la temperatura, debido a la difusión acelerada de especies de cianuro de oro.

- **Concentración de oro en la solución**

La cinética de adsorción del oro y la capacidad de carga del carbón aumentan al incrementar la cantidad de oro en la solución de alimentación, dado que con ello se aumenta la difusión de especies.

- **Concentración de cianuro**

La solubilidad del oro aumenta con el incremento de la concentración de cianuro en solución, por tanto, al aumentar la concentración de cianuro libre en solución se disminuyen la cinética de adsorción y la capacidad de carga del carbón. Sin embargo, una alta concentración de cianuro libre, impide que otros metales interfieran en la adsorción del oro en el carbón.

- **pH**

En el rango de pH de 9 a 11, no puede disminuir debido que se formaría HCN, la variación de éste no tiene un efecto significativo sobre la velocidad de adsorción. En la práctica el pH es usualmente mantenido sobre 10 para evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis.

- **Concentración de carbón en la pulpa**

La adsorción de oro se ve favorecida con el incremento de la cantidad de carbón activado. Se ha encontrado que los valores óptimos de esta variable están en el rango de 400 - 800 mL solución/g carbón.

#### **3.2.2.4 Desorción del oro del carbón activado**

El descubrimiento de J.B. Zadra de un método de desorción a inicios de 1950 hizo posible la aplicación a escala comercial del proceso CIP. Antes de este desarrollo el carbón había sido utilizado con éxito en la adsorción de oro, pero el único método efectivo para recuperar el metal era la fusión del carbón, presentando limitaciones económicas para la aplicación del método.

Las exigencias básicas en un proceso de desorción son [8]:

- Recuperar la mayor cantidad de valores metálicos cargados en el carbón, a partir de una solución de desorción, en un volumen lo más pequeño posible.

- Producir una solución impregnada con alta concentración de metales preciosos.
- Dejar el carbón listo para retornar al sistema de adsorción.
- Operar con seguridad y de forma económica.

Actualmente, existen cuatro técnicas de elución empleadas a escala industrial:

- **Proceso atmosférico Zadra:** Comprende la reextracción del oro a partir del carbón cargado usando una solución de 0.1% NaCN y 1% NaOH, a una temperatura de 85° a 95° C.

El proceso es llevado a presión atmosférica y el tiempo total requerido para desorber el carbón, hasta un nivel lo suficientemente bajo de oro, puede estar en el rango de 24-60 horas.

Este proceso es simple y los costos de capital y operación son relativamente bajos, lo cual lo hace apropiado para operaciones a pequeña escala.

- **Proceso de reextracción con alcohol:** El carbón cargado es desorbido usando una solución de 0.1% NaCN, 1% NaOH y 20% de alcohol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), en volumen, a una temperatura de 80°C.

El proceso es operado a presión atmosférica y la adición de alcohol a la solución de desorción reduce el ciclo de elución a 5-6 horas. Las ventajas de este método son: Tiempos cortos de desorción, altas concentraciones de metales en la solución final de elución, baja temperatura de operación y bajo costo de capital.

- **Proceso de reextracción a alta presión:** Incluye la reextracción de carbón cargado con una solución de 0.1% NaCN y 1% NaOH a 150°C y una presión de 50 psi, durante 2 a 6 horas. El aumento de la presión acelera el proceso, de tal forma que se reduce el consumo de reactivos y de carbón.

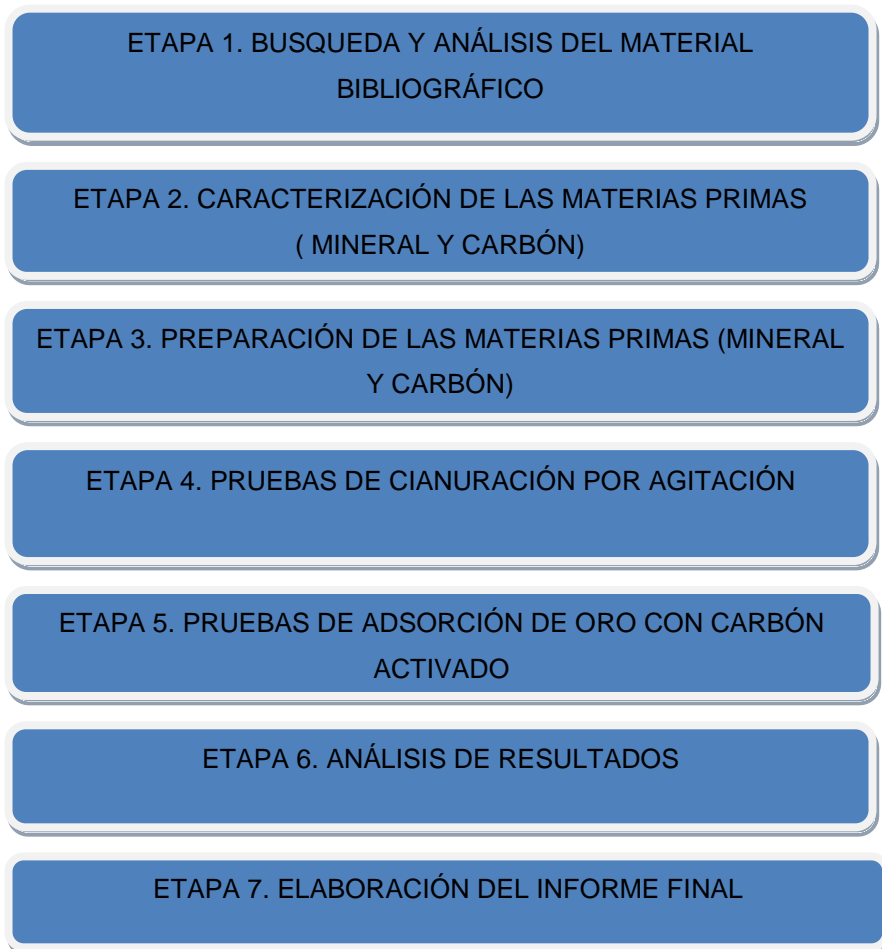
- **Proceso Anglo Americano:** El proceso implica una serie de procedimientos en general, comenzando con un lavado con ácido seguido de un lavado con agua para eliminar el ácido residual. El carbón se sumerge entonces durante unos 30 minutos en una solución que contiene cerca de 1% de NaOH y 5% NaCN. Para la elución se usan 5 lechos de volúmenes de agua caliente a una velocidad de flujo de 3 lechos de volumen por hora. La temperatura de operación recomendada es de 110°C y la presión aplicada está entre 50 y 100 KPa. El ciclo total incluyendo el lavado ácido es de 9 horas, el cual es considerablemente más corto que la reextracción atmosférica Zadra.

Las ventajas del proceso Anglo Americano son similares a aquellas de la reextracción a alta presión, las principales desventajas del proceso incluye el uso de temperaturas y presiones elevadas y el requerimiento para corrientes múltiples lo cual tiende a incrementar la complejidad del circuito.

## 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 6 se recogen las principales etapas en la que se dividió el desarrollo del proyecto.

FIGURA 6. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del proyecto.



A continuación se describen las actividades experimentales desarrolladas y que permitieron el cumplimiento de los objetivos planteados.

#### **4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS (MINERAL Y CARBÓN ACTIVADO)**

##### **4.1.1 Mineral**

Tal como se menciona en el apartado 2 (Descripción del problema), el mineral utilizado para la presente investigación corresponde a las colas del proceso de concentración de la empresa minera “La Baja” del municipio de California, Santander. Dicho material se caracterizó mineralógica, química y granulométricamente mediante las siguientes técnicas.

- **Difracción de Rayos X (DRX)**

Con esta técnica se determinaron las especies cristalinas presentes en el mineral. Los análisis fueron realizados en el difractómetro Rigaku Miniflex del Grupo de Catalizadores y Adsorbentes de la Universidad de Antioquia (Medellín), con radiación  $\text{CuK}\alpha_1$  y a una velocidad de barrido de  $2^\circ/\text{min}$ .

- **Fluorescencia de Rayos X (FRX)**

Permitió determinar la composición elemental del mineral. Dicho análisis fue realizado en el centro de Desarrollo Productivo de Joyería (C.D.P) en Bucaramanga, empleando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X Shimadzu EDX 800 HS de energía dispersa.

- **Ataque Químico con Agua Regia y Ensayo al Fuego**

Se realizaron con el fin de cuantificar los contenidos de oro y plata en el mineral. Los procedimientos seguidos para tal fin se presentan en los anexos A y B. Estos análisis se realizaron en los laboratorios de Ingeniería Metalúrgica de la UIS y de la CDMB.

- **Análisis Granulométrico por Tamizaje**

Con él se obtuvo la distribución por tamaños de partículas presentes en el mineral de trabajo (colas de concentración de la mina “La Baja”). Dicho análisis se realizó en el ro-tap de la Planta de Aceros de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad, utilizando la serie de tamices Tyler números: 18, 35, 60, 120, 230, 400.

#### **4.1.2 Carbón Activado**

Para las pruebas de adsorción de los metales preciosos disueltos, se utilizó carbón activado de cascara de coco, comercializado por la empresa Proquímica Ltda. Su caracterización consistió de:

- **Análisis Próximo**

Este análisis consistió en la determinación de los contenidos de humedad, cenizas, materia volátil y % carbón fijo. Para tal fin se siguieron los procedimientos especificados en las normas ASTM números D-3173, D-3174 y D-3175. Tal análisis se realizó en el laboratorio de Pirometalurgia de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UIS.

- **Distribución Granulométrica**

El tamizaje del carbón se llevó a cabo empleando la serie de tamices Tyler números: 10, 12, 16, 20, 35, 50 y 100.

- **Determinación de Área Superficial y Tamaño de Poros**

Estas pruebas se realizaron mediante el método de adsorción B.E.T (Brunauer-Emmet-Teller), en un analizador de área superficial Nova 1200, perteneciente al Centro de Investigación en Catálisis (CICAT) de la UIS.

## **4.2 PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS**

### **4.2.1 Preparación del mineral**

El mineral de partida fue recolectado por Ingenieros de la CDMB, desde las instalaciones de la empresa minera “La Baja”.

Teniendo en cuenta que el mineral utilizado para el presente proyecto eran colas de concentración, su preparación para los ensayos de cianuración fue sencilla:

- Secado al aire libre durante cuatro días.
- Muestreo mediante el método de cono y cuarteo. De esta forma se obtuvieron las muestras representativas del mineral, requeridas tanto para su caracterización como para los ensayos de cianuración y adsorción con carbón activado.

### **4.2.2 Preparación del Carbón Activado**

El carbón activado original suministrado por la CDMB venía con un tamaño de partícula menor a 3mm.

Por medio del método de cono y cuarteo se tomaron muestras representativas para su caracterización y ensayos de adsorción de oro y plata.

Antes de su uso en el proceso CIP, el carbón fue lavado con agua destilada y ácido clorhídrico para eliminar material muy fino y desorber cualquier especie previamente adsorbida en el mismo (Ress y Van Derventer ,2001)[9].

### 4.3 PRUEBAS DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN

Teniendo en cuenta que la viabilidad técnica de aplicar el proceso CIP depende, en parte, de que el mineral aurífero tenga una buena respuesta al proceso de cianuración por agitación, resulta imprescindible evaluar la lixiviabilidad del mineral bajo tal proceso. Para este caso, esto es aún más importante dado que en la mina La Baja no se ha trabajado con este método de lixiviación.

En tal sentido, se llevó a cabo una serie de ensayos de cianuración por agitación con el fin de encontrar las condiciones más adecuadas de tal proceso, para posteriormente realizar las pruebas de adsorción con carbón activado.

En la figura 7, se presenta el montaje utilizado en esta parte del proyecto. En todos los casos se utilizó un recipiente de vidrio de 2L, donde se preparó la pulpa con 300 g de mineral y cantidades variables de solución lixivante, la cual se agitó mecánicamente.

FIGURA 7. Montaje utilizado en los ensayos de cianuración.



Las variables estudiadas y sus niveles se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Variables evaluadas en las pruebas de cianuración por agitación.

Concentración de cianuro (g/L)	1.5, 2.0, 2.5, 3.0
pH	10, 11, 12
Velocidad de agitación (r.p.m)	200, 300, 400, 500
Concentración de sólidos (%)	23, 33, 40 , 50

La variable respuesta en todos los casos fue el porcentaje de disolución de oro y plata, por tal motivo, se tomaron alícuotas de 20mL de la solución lixivante a diferentes tiempos (6, 12, 18 y 24 horas). Las concentraciones de oro y plata se determinaron por la técnica de Espectroscopia de Adsorción Atómica, con ayuda de un espectrofotómetro Perkin- Elmer 2380 perteneciente a la CDMB.

El control del consumo de cianuro se hizo mediante la titulación de cianuro libre en solución con nitrato de plata. El procedimiento utilizado se resume en el Anexo C.

Algunos de los residuos sólidos fueron caracterizados mediante DRX, Ataque químico con agua regia y Microscopia electrónica de barrido con análisis EDS (SEM-EDS), con el fin de evaluar los cambios mineralógicos, químicos y morfológicos del mineral durante la cianuración.

Los análisis de Microscopia Electrónica de Barrido fueron realizados en el microscopio JEOL JSM- 6490LV del Laboratorio de Análisis Superficial de la Universidad de Antioquia (Medellín).

#### **4.4 ENSAYOS DE ADSORCIÓN DE ORO Y PLATA CON CARBÓN ACTIVADO**

Una vez establecidas las mejores condiciones de cianuración del mineral, se procedió a aplicar el proceso de adsorción de metales preciosos con carbón activado en la pulpa proveniente de cianuración.

Estos ensayos se realizaron usando el mismo montaje de la cianuración por agitación (ver figura 7). El carbón activado se adicionó a la pulpa mineral una vez finalizadas las 24 horas de cianuración. Las condiciones experimentales empleadas en esta parte de la investigación se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Variables evaluadas en las pruebas con carbón activado.

VARIABLES	NIVELES			
Relación carbón/solución (g/L)	1.3	2	5	
Granulometría del carbón (mm)	1-2	1-3	2-3	
Velocidad de agitación (r.p.m)	200	300	400	500
Porcentaje de sólidos en pulpa	23	33	40	50

La variable respuesta fue el porcentaje de adsorción de oro y plata desde la solución. Para lo cual se tomaron alícuotas de 20 mL de solución a diferentes tiempos (1, 6, 12 y 24 horas). Nuevamente la concentración de metales en solución se determinó mediante Espectrofotometría de Adsorción Atómica.

Los residuos sólidos (carbón y mineral) fueron separados de la solución con ayuda de tamices, posteriormente se lavaron por separado con agua destilada para eliminar los restos de cianuro y finalmente secados en estufa.

El carbón cargado con los metales preciosos se caracterizó mediante la técnica de Espectroscopia de Infrarrojos por Transformada de Fourier (FT-IR) y SEM- EDS, con el fin de determinar los grupos funcionales del carbón involucrados con la adsorción de los metales, así como evaluar los cambios morfológicos del carbón durante la etapa de adsorción.

Los análisis de FT-IR fueron realizados en el espectrómetro SHIMADZU FTIR 8400S, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Química de la UIS.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

#### 5.1.1 Mineral

- Análisis Químico Elemental

El tenor de oro y plata en el mineral fue obtenido mediante Ensayo al Fuego y por Ataque Químico con Agua Régia. En la tabla 3 se compararon los resultados obtenidos por ambos métodos, tales valores se obtuvieron al promediar los resultados de tres repeticiones de los mismos.

Tabla 3. Tenores de Au y Ag en el mineral.

METAL	Tenor (g/ton mineral)		% Error
	Ensayos al Fuego	Ataque Químico con Agua Régia	
Oro	15.75	14.3	9.2
Plata	165.75	170.0	2.6

Las diferencias obtenidas por los dos métodos son típicas de esta clase de análisis. Para cálculos posteriores se tendrán en cuenta los valores de tenores obtenidos mediante el ensayo al fuego, dado que para dicho análisis se toma una muestra de mineral mucho más grande que para el ataque químico, por tanto es de esperarse que el error sea menor para el primer tipo de análisis.

La relación Ag/Au obtenida ( $165.75 \text{ g Ag/ton} / 15.75 \text{ g Au/ton} = 10.52$ ) hace factible la aplicación del proceso CIP para recuperar los metales una vez disueltos, dado que cuando dicha relación es demasiado alta (mayor de 12) (Cárdenas, 1994)[10] tal proceso no es recomendable por la competencia de la plata con el oro por su gran adsorción sobre el carbón, lo que hace que se necesite de grandes cantidades de

carbón para recuperar pequeñas cantidades de oro, lo cual no es rentable económicamente.

Finalmente, al mineral se le realizó análisis por Fluorescencia de Rayos x para obtener su análisis elemental completo. Dicha información es importante para identificar posteriormente las especies cristalinas presentes en el mineral, con ayuda de la técnica de Difracción de Rayos X.

Los resultados FRX se muestran en la tabla 4. Se observa que los elementos más importantes en el mineral son Silicio (27.7%), Aluminio (8.6%), Azufre (4.4%), Hierro (5.3%) y Potasio (3.4%).

Otros metales como Cobre, Plomo y Zinc están presentes en cantidades insignificantes por lo que seguramente no afectarán los procesos de cianuración y de adsorción de Au y Ag con carbón activado.

Tabla 4. Análisis por Fluorescencia de Rayos X del mineral

Nombre	Analito (óxido)	Resultado	Analito	Resultado	Des. Estándar
Silicio	SiO <sub>2</sub>	59.341 %	Si	27.729 %	0.127
Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.271 %	Al	8.609 %	0.091
Azufre	SO <sub>3</sub>	10.879 %	S	4.352 %	0.038
Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.629 %	Fe	5.335 %	0.018
Potasio	K <sub>2</sub> O	4.023 %	K	3.353 %	0.021
Titanio	TiO <sub>2</sub>	0.574 %	T	0.346 %	0.011
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.306 %	P	0.132 %	0.024
Plomo	PbO	0.295 %	Pb	0.273 %	0.003
Magnesio	MgO	0.243 %	Mg	0.146 %	0.048
Cobre	CuO	0.124 %	Cu	0.099 %	0.002
Tungsteno	WO <sub>3</sub>	0.104 %	W	0.083 %	0.003
Manganeso	MnO	0.087 %	Mn	0.067 %	0.003
Estroncio	SrO	0.087 %	Sr	0.074 %	0.001
Antimonio	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.018 %	Sb	0.015 %	0.002
Zinc	ZnO	0.010 %	Zn	0.008 %	0.001
Rubidio	Rb <sub>2</sub> O	0.006 %	Rb	0.006 %	<0.001
Molibdeno	MoO <sub>3</sub>	0.003 %	Mo	0.002 %	0.001
			O	Balance %	---

Fuente: Laboratorio de fluorescencia de rayos x. Corporación Centro de Desarrollo Productivo de Joyería CDP de Joyería.

- Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

En la figura 8 se presenta una micrografía SEM, a 500 aumentos, del mineral de trabajo. Se observan partículas con gran variedad de tamaños (incluso mayores a 100  $\mu\text{m}$ ), y que por su morfología y coloración (oscura o clara) se infiere que tienen diferente composición. El mapeo de tal micrografía obtenido con el detector de energía dispersiva de Rayos X (EDX) se muestra en la figura 9.

FIGURA 8. Micrografía SEM del mineral (500x).

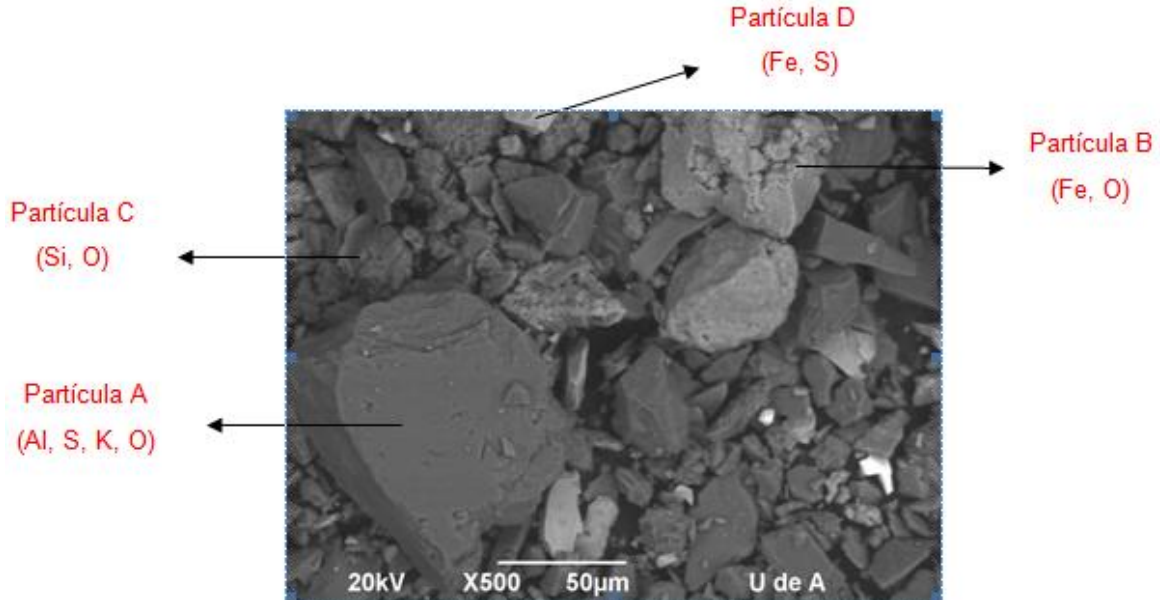
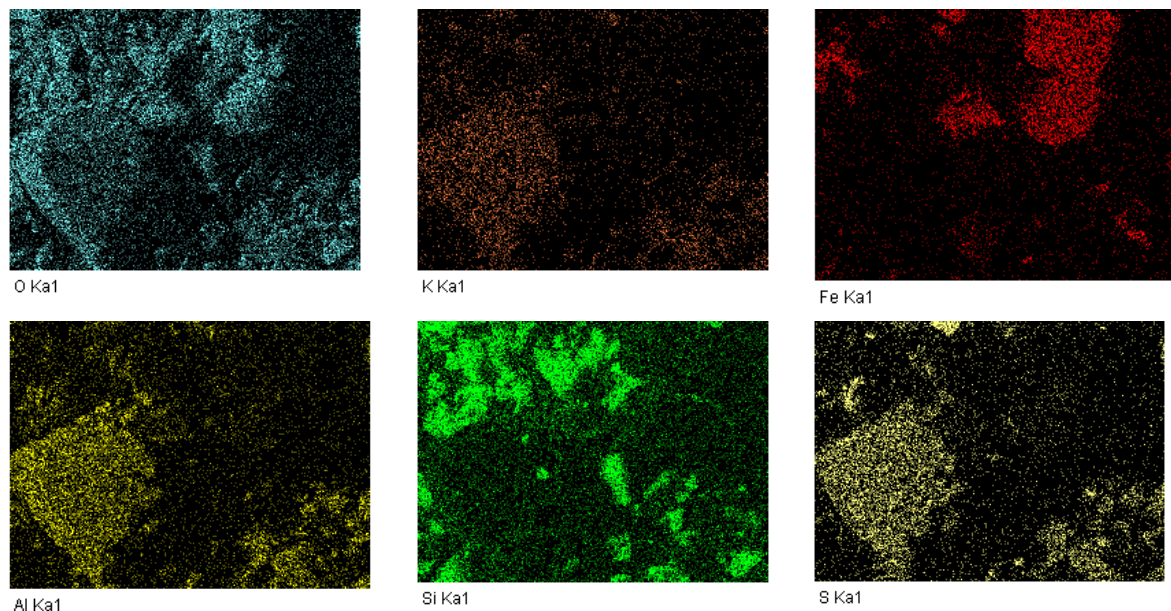


FIGURA 9. Mapeo de elementos presentes en la porción de mineral mostrado en la figura 8.

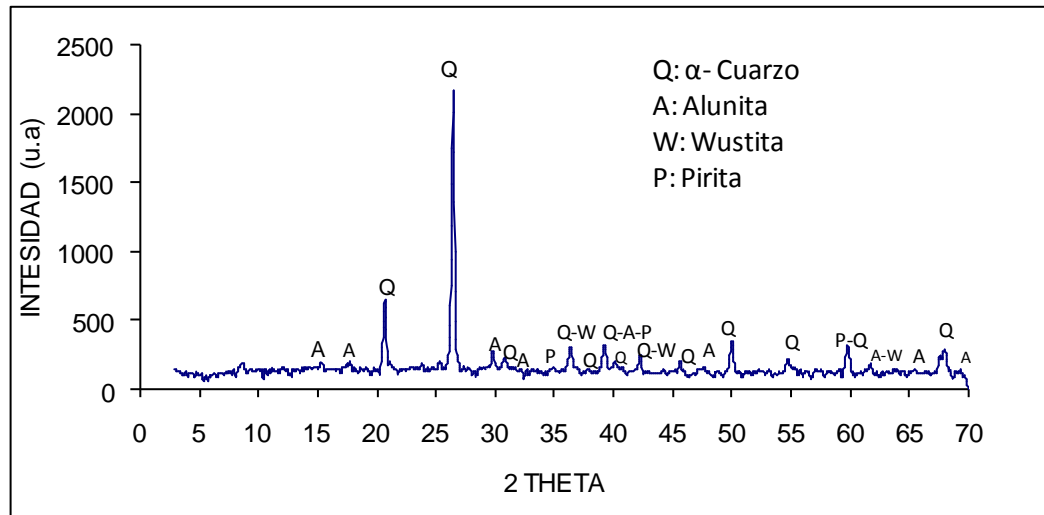


Las imágenes permiten diferenciar cuatro especies minerales: Una rica en Al, S, K y O (denotada como A en la micrografía de la figura 9), otra enriquecida en Fe y O (denotada como B) que seguramente corresponde a un óxido de hierro. La tercera especie esta enriquecida en Si y O (denotada como C), por lo que probablemente corresponde a  $\text{SiO}_2$ . La cuarta especie (rica en Fe y S) es denotada con la letra D.

- Difracción de Rayos X

El difractograma del mineral de estudio es mostrado en la figura 10. Las especies cristalinas más importantes en el mineral son cuarzo ( $\alpha\text{-SiO}_2$ ), alunita ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), wustita ( $\text{FeO}$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ). Estos resultados concuerdan perfectamente con el mapeo EDX de la muestra (figura 9), es decir la partícula “A” correspondería a alunita, la “B” a wustita, la “C” a cuarzo y la “D” a pirita.

FIGURA 10. Difractograma del mineral.



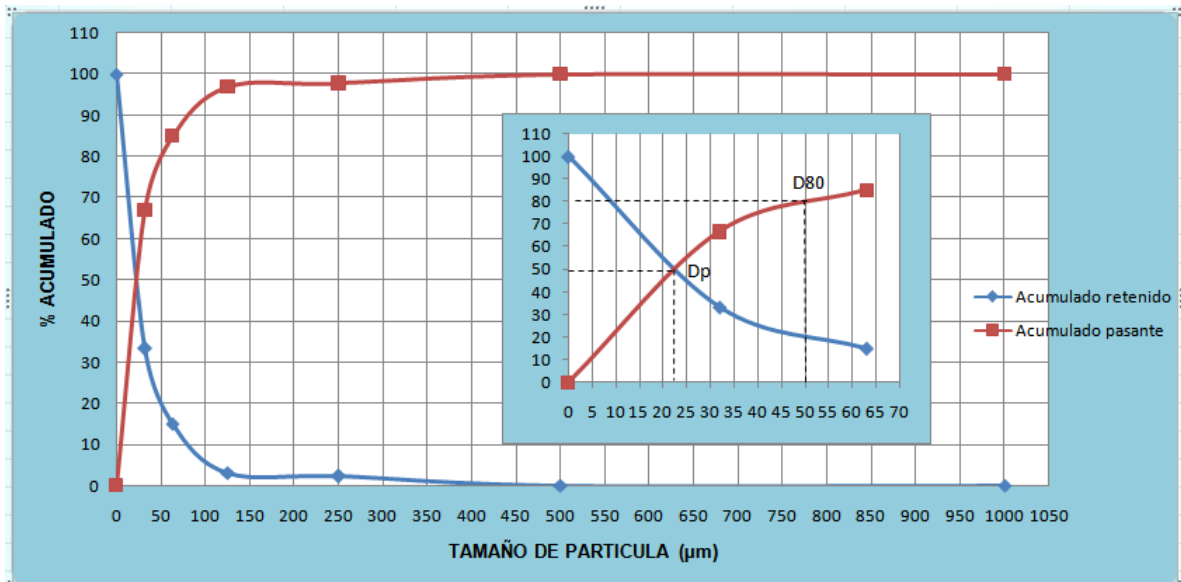
Estos resultados hacen prever una fácil disolución de los metales preciosos, dado que no existen especies refractarias sulfuradas con las cuales puedan estar asociados el oro y la plata.

- Distribución granulométrica del mineral

La distribución granulométrica del mineral es presentada en la figura 11. Se observa que las partículas de mineral tienen un tamaño menor a 500  $\mu\text{m}$ , siendo el tamaño medio de partícula de 22.5  $\mu\text{m}$  y el  $D_{80}$  igual a 50  $\mu\text{m}$ .

De acuerdo con estas características, no hace falta mayor preparación del mineral para el proceso de cianuración, pues tiene un tamaño de partícula adecuado ( $D_{80}$  menor a 180  $\mu\text{m}$ ).

FIGURA 11. Distribución granulométrica del mineral.



### 5.1.2 Carbón

- Análisis próximo

Los resultados del análisis próximo del carbón se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Análisis próximo del carbón.

Nombre	Valor
Humedad	14%
Cenizas	10.65%
Materia volátil	9.96%
Azufre	0.1%
Carbono	65.29 %
Índice de hinchamiento	0
Poder calorífico	9626.89 BTU/Lb

De acuerdo a los resultados anteriores, el carbón se clasifica como subbituminoso, grupo B, no aglomerable.

Las características de éste carbón están dentro de los rangos de valores aceptados para los carbones activados [11], es decir: 11-14% de cenizas, 0.1-0.3% azufre, 50-95% carbono, 5-18% humedad, 5-10% materia volátil y poder calorífico de 8000-16000 BTU/Lbs.

- Microscopia Electrónica de barrido (SEM) y microanálisis EDS

En las figuras 12 y 13 se muestran, respectivamente, una micrografía SEM del carbón y el mapeo elemental de la misma.

FIGURA 12. Micrografía SEM (500x) del carbón activado.

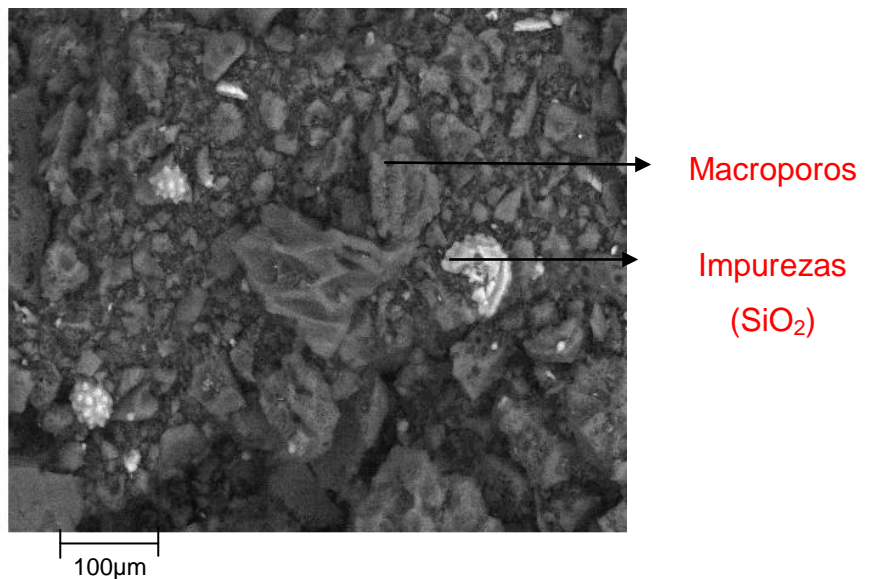
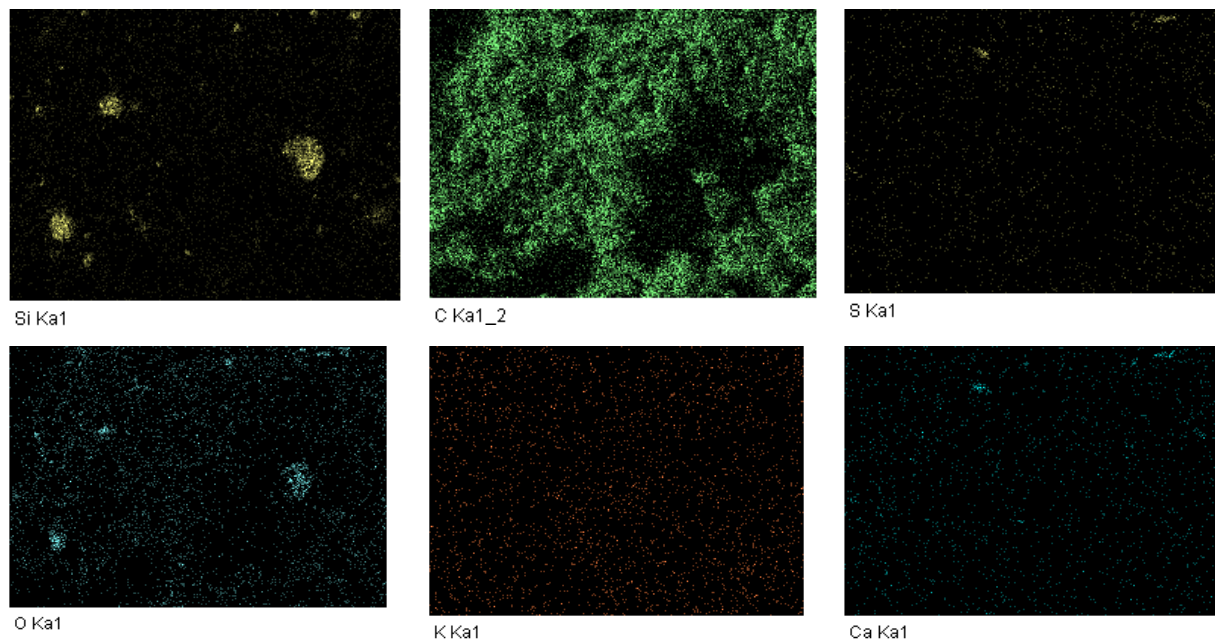


FIGURA 13. Mapeo de los elementos presentes en la porción de carbón mostrado en la figura 12.

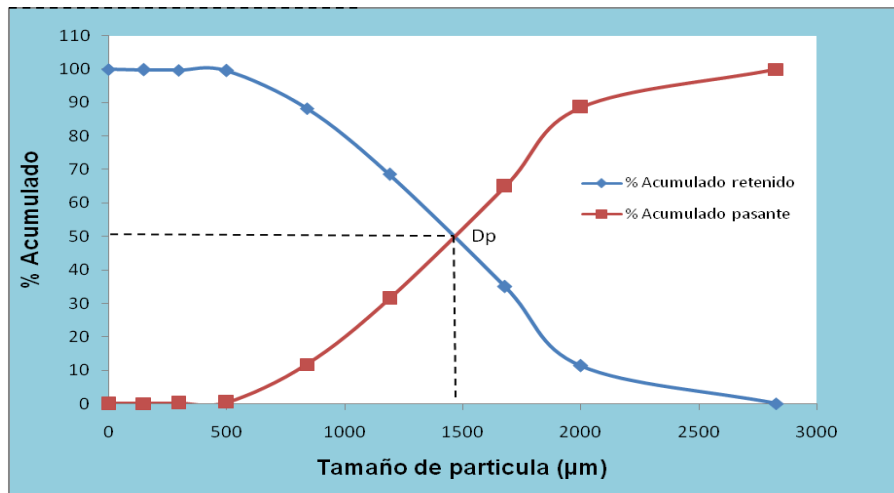


En la figura 12 se aprecian los macroporos del carbón, con tamaños incluso superiores a  $10\mu\text{m}$ . También se observan impurezas en el material, que de acuerdo al mapeo (figura 13) corresponde a  $\text{SiO}_2$ , por lo que seguramente no interferirán en el proceso de adsorción de Au y Ag.

- Distribución granulométrica del carbón activado

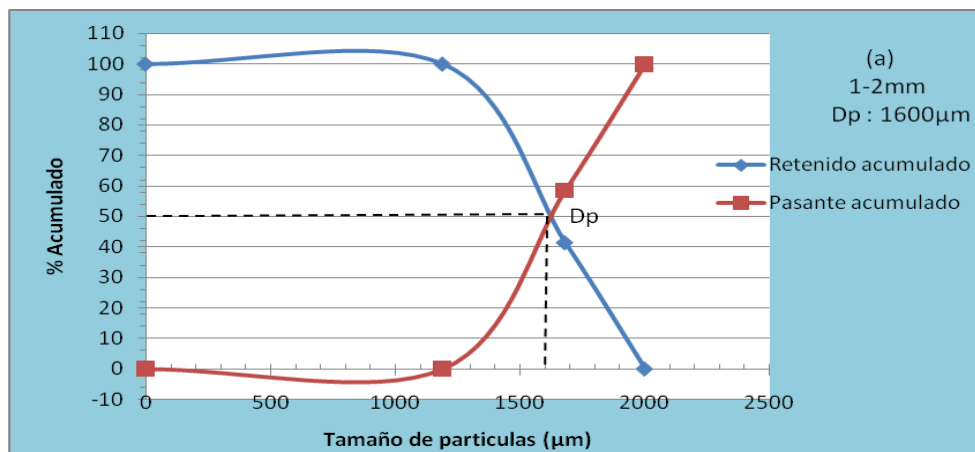
En la figura 14 se presenta la distribución granulométrica del carbón activado antes de su clasificación. Se observa que este tiene un tamaño menor a  $3\text{mm}$  y un  $D_p=1477.56\ \mu\text{m}$ .

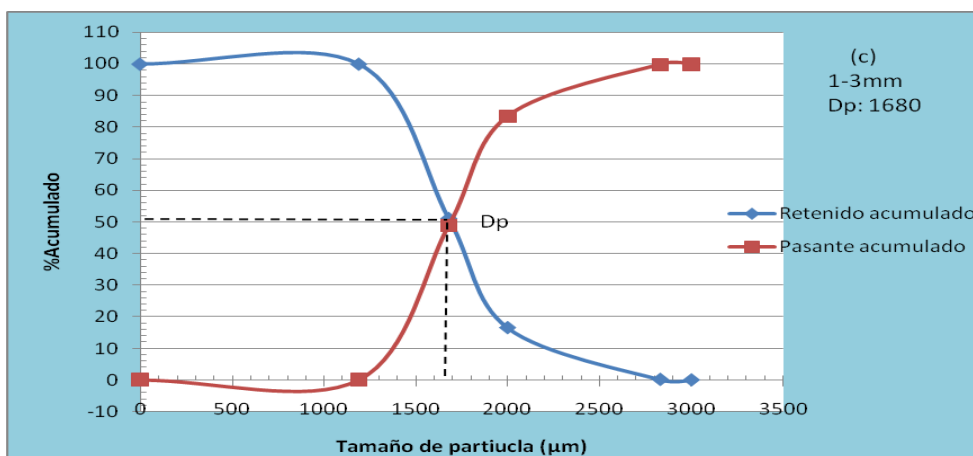
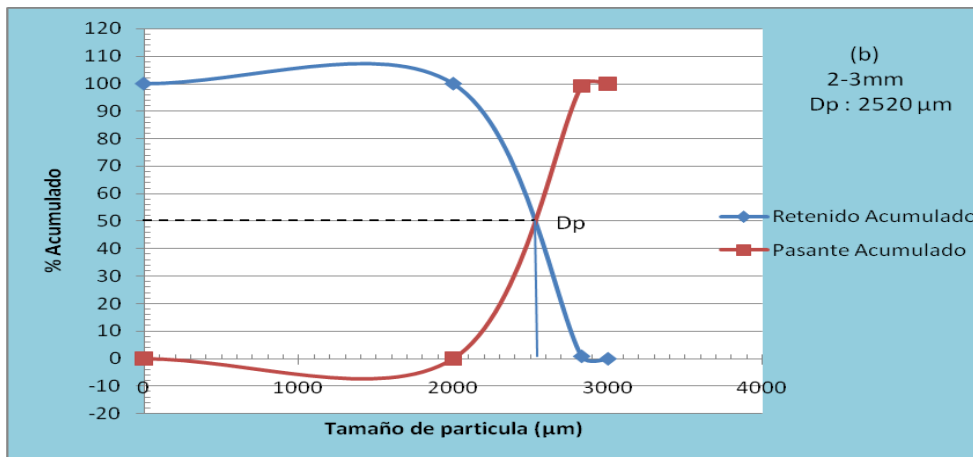
FIGURA 14. Distribución granulométrica del carbón activado original.



Las distribuciones granulométricas de las tres fracciones de carbón utilizadas en las pruebas de adsorción (1-2mm, 2-3mm, 1-3mm), se presentan en las figuras 15a, 15b, 15c, según las cuales los tamaños medios de partícula son 1600 μm, 2520 μm y 1680 μm respectivamente.

FIGURA 15. Distribución granulométrica de las fracciones de carbón empleado.





- Área superficial y Tamaño de poros

Se realizaron análisis de área superficial, por el método B.E.T, a muestras de carbón en los tres rangos granulométricos seleccionados para el estudio de adsorción de metales preciosos, estos son 1-2mm, 2-3mm y 1-3mm.

En la tabla 6 se presentan los valores del área superficial específica de cada muestra.

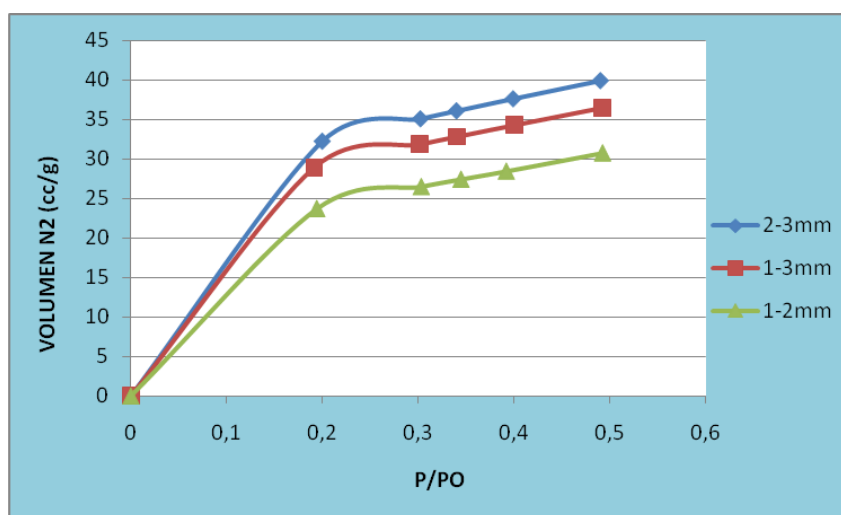
Tabla 6. Área superficial específica de las fracciones granulométricas del carbón.

Fracción granulométrica del carbón (mm)	Dp (mm)	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)
1-2	1.6	678.0133
2-3	2.52	891.8383
1-3	1.68	890.8035

Los anteriores valores de área superficial están dentro del rango de valores típicos (500-1500 m<sup>2</sup>/g) [12] para los carbones activados. Se observa que las mayores áreas superficiales (891.8 y 890.8 m<sup>2</sup>/g) están relacionadas con los mayores tamaños de partículas, D<sub>p</sub>, del carbón, lo cual puede indicar que además de los microporos y mesoporos, los macroporos también están involucrados en la capacidad de adsorción del carbón, dado que estos son los primeros en destruirse durante la molienda del carbón.

En la figura 16 se presentan las isothermas de adsorción para las tres fracciones del carbón. El comportamiento de las isothermas se aproxima a la tipo I o de Langmuir [13] (ver anexo D), la cual es característica de procesos en los que se produce el llenado lento de la monocapa en los microporos (con forma de hendidura y con diámetros menores a 2nm). También se puede encontrar semejanza entre las isothermas obtenidas con la tipo II, dado que la segunda zona de adsorción (meseta) presenta una cierta pendiente, es decir que la adsorción continúa dentro de los mesoporos (2-50nm) y macroporos (mayores de 50nm) formando multicapas.

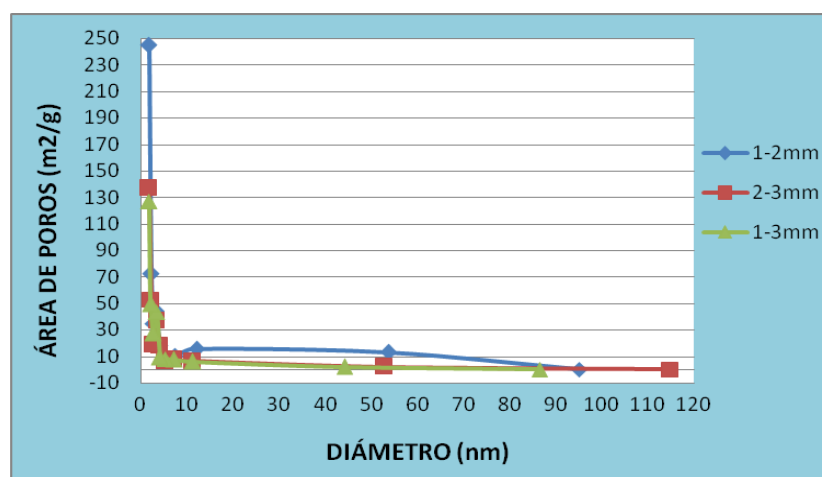
FIGURA 16. Isothermas de adsorción de las fracciones granulométricas de carbón.



En la figura 17 se presentan las distribuciones de tamaño de poros para las tres distribuciones granulométricas del carbón. De acuerdo con esta figura, en el carbón

hay presencia de microporos, mesoporos y macroporos. Los microporos están ocupando aproximadamente el 95% de la superficie total. Mientras que los mesoporos y macroporos ocupan apenas el 5% de la superficie total.

FIGURA 17. Distribución de tamaño de poros en las muestras de carbón.



## 5.2 ENSAYOS DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN

A continuación se presentan los resultados de los estudios de cianuración del mineral auro-argentífero.

### 5.2.1 Efecto del pH sobre la disolución de oro y plata

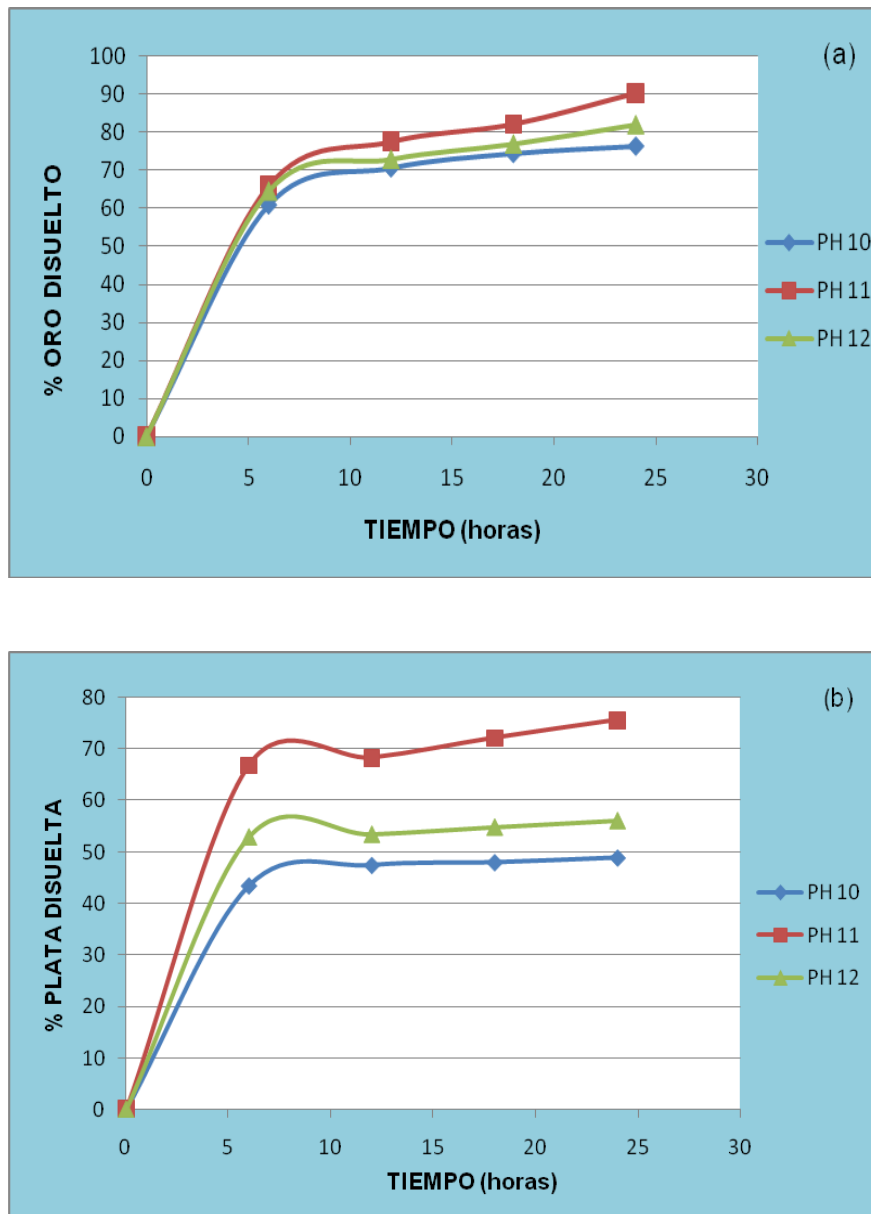
Las condiciones operacionales de los ensayos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Condiciones operacionales del efecto del pH en la cianuración.

PH	10, 11, 12
Concentración de cianuro	2.0 g/L
Velocidad de agitación	300 r.p.m
Porcentaje de sólidos	23

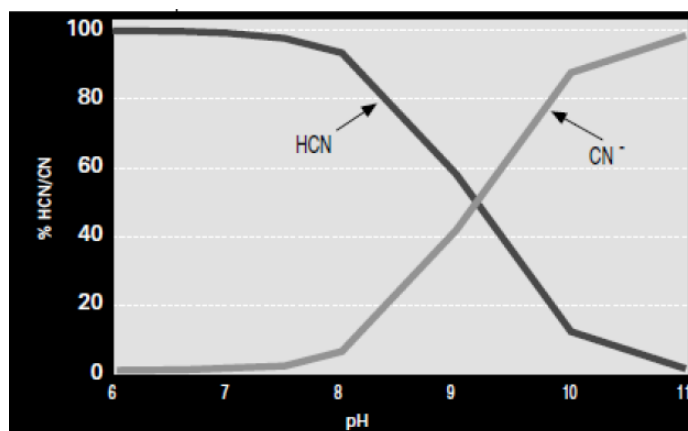
En las figuras 18a y 18b se presentan las curvas cinéticas de disolución de oro y plata respectivamente.

FIGURA 18(a, b) Efecto del pH en la cianuración del mineral.



Tanto para la disolución de oro como de plata se observa un efecto positivo en el aumento de pH de 10 a 11, lo cual se explica con la curva de especiación para el cianuro mostrada en la figura 19 (Ibíd., p. 155) [14].

FIGURA 19. Curva de especiación del cianuro.



De acuerdo con dicha curva, en las soluciones de cianuro la concentración del ion  $\text{CN}^-$  aumenta a medida que se aumenta el pH. A  $\text{pH}=10$  el cianuro está presente en un 88% como  $\text{CN}^-$  y el restante 12% como ácido cianhídrico (HCN), mientras a  $\text{pH}=11$  la totalidad del cianuro está como  $\text{CN}^-$ .

Teniendo en cuenta lo anterior, es evidente que el  $\text{pH}=11$  favorece la disolución de metales preciosos, por la mayor concentración de ion cianuro, a la vez que evita la generación de gas cianhídrico, el cual es ampliamente conocido por su gran toxicidad.

Por su parte un mayor aumento del pH, de 11 a 12, tiene un efecto negativo en la disolución de los metales, lo cual se explica por el seguimiento de la reacción de disolución del oro (ver reacción (1)). Un gran exceso de iones  $\text{OH}^-$  cambia el sentido de la reacción, de tal forma que se ralentiza la cinética del proceso.

Teniendo en cuenta estos resultados, los siguientes ensayos de cianuración fueron realizados a  $\text{pH}=11$ .

### 5.2.2 Efecto del porcentaje de sólidos y de la concentración de cianuro en la cianuración del mineral

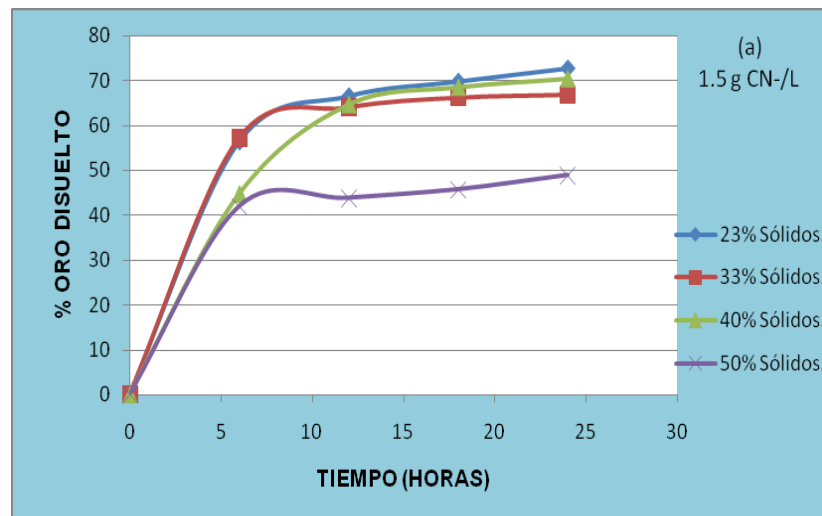
En la tabla 8 se aprecian las condiciones operacionales de esta serie de ensayos. Los resultados de este estudio se presentan en las figuras 20(a, b, c) y 21(a, b, c).

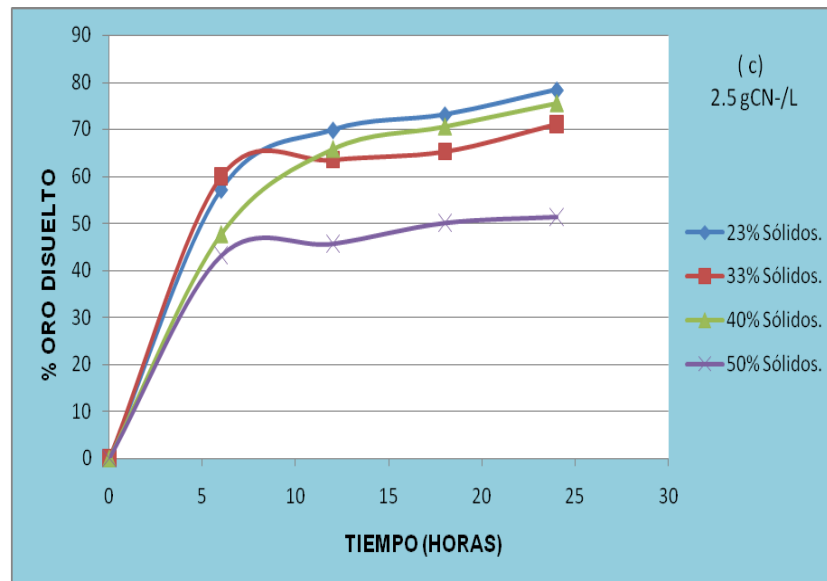
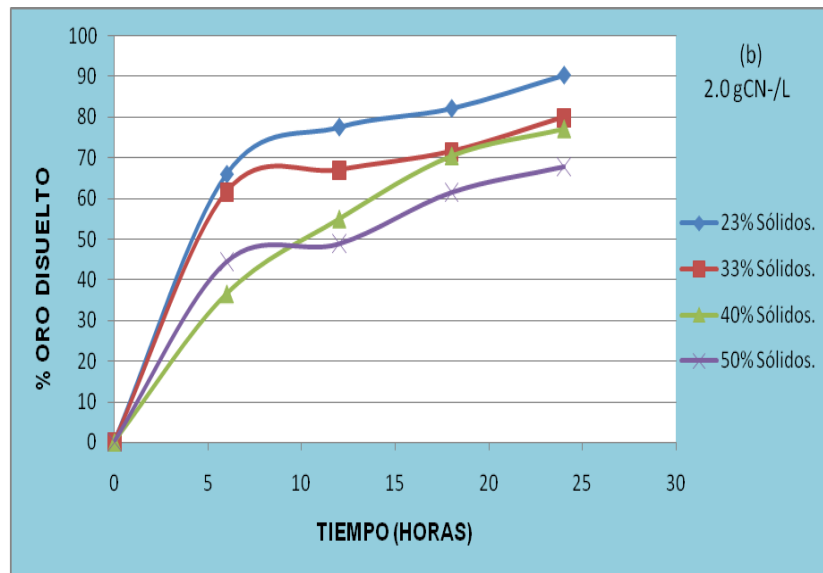
En cuanto al efecto de porcentaje de sólidos, la tendencia general, tanto para la disolución de oro como de plata, es que al aumentar la relación volumen de solución/cantidad de sólidos se acelera la cinética de disolución. Esto quiere decir que el sistema está controlado, por lo menos en parte, por la difusión del ion  $CN^-$ .

Tabla 8. Condiciones operacionales para el estudio de las variables % sólidos y concentración de cianuro.

Porcentaje de sólidos (%)	23, 33, 40, 50
Concentración de cianuro ( g/l)	1.5, 2.0, 2.5
PH	11
Velocidad de agitación (r.p.m)	300

FIGURA 20. Efecto de la concentración de cianuro y del % de sólidos en la disolución de oro.





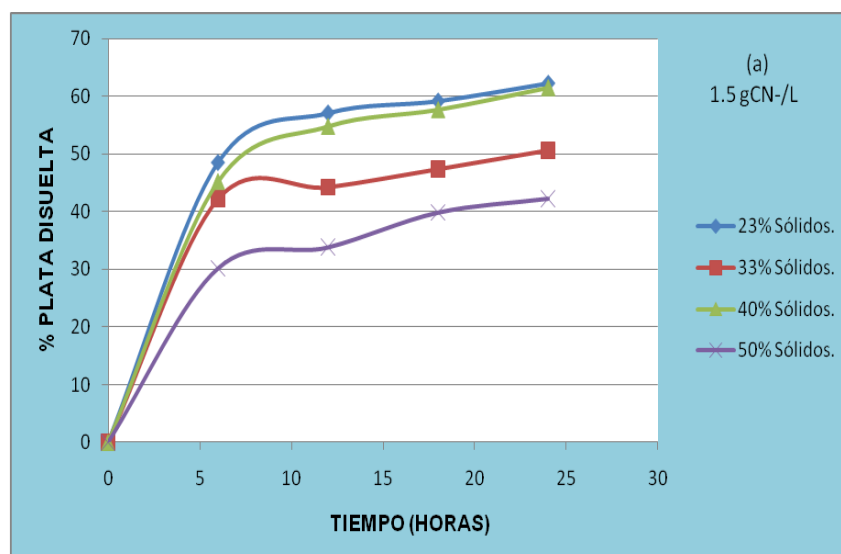
En cuanto al efecto de la concentración de cianuro, los resultados parecen indicar que el aumento de concentración de  $\text{CN}^-$  de 1.5 a 2.0 g/L favorece la disolución de los metales preciosos, pues los porcentajes de disolución de oro aumentan del rango de 49-73% al de 68- 90% con tal aumento de la concentración de  $\text{CN}^-$ .

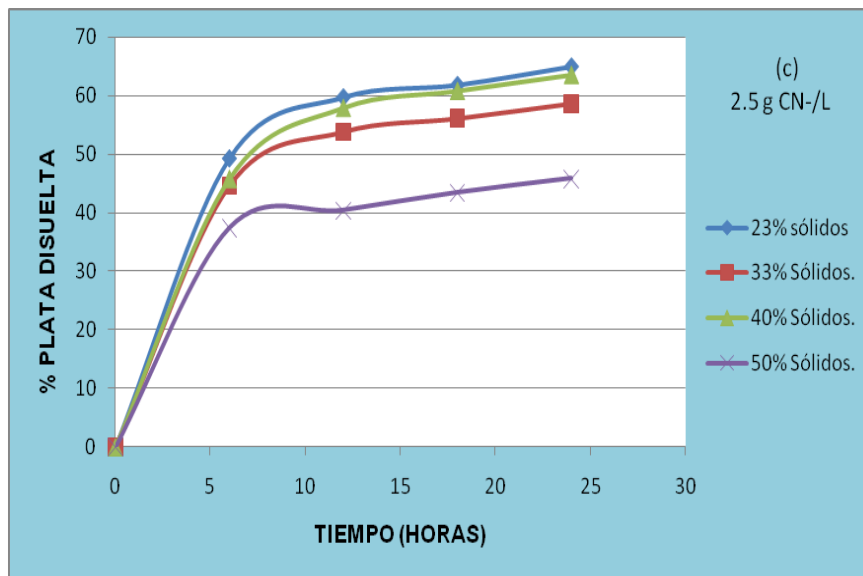
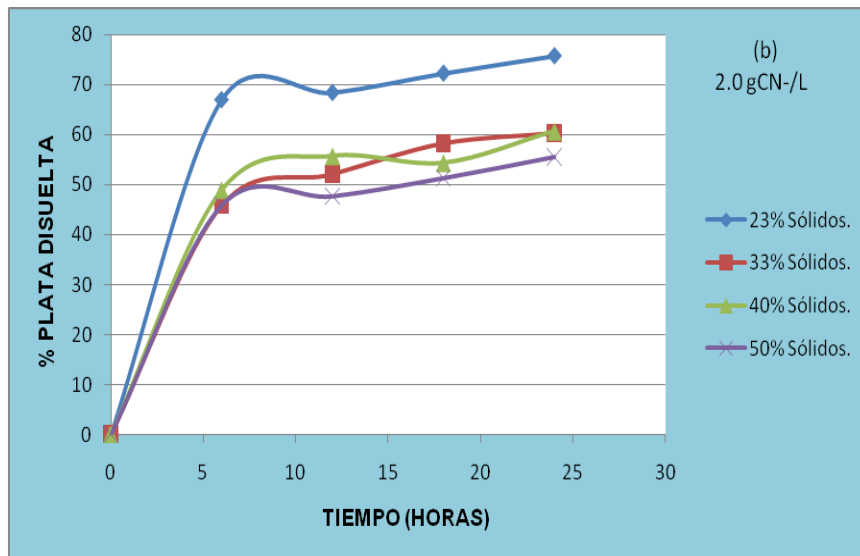
Al seguir aumentando la concentración de cianuro hasta 2.5 g/L, la disolución de metales decae. Para el caso del oro, se pasa del rango de 68-90% al de 52-77%. Un

comportamiento similar es observado para la cinética de disolución de plata (figura 19), donde tales valores de disolución para 1.5, 2.0 y 2.5 g CN<sup>-</sup>/L están en los rangos de 43-63%, 56-76% y 46-66%, respectivamente.

Estos resultados indican que el efecto esperado al aumentar la concentración de cianuro, es decir aumentar la velocidad de difusión del ion CN<sup>-</sup> (reactante) sólo ocurre en el rango de 1.5 a 2.0 g CN<sup>-</sup>/L. Mayores aumentos de la concentración de cianuro ralentizan la cinética de disolución del oro, debido al favorecimiento de otras reacciones, especialmente la formación de cianocomplejos con otros metales en solución (Mardens y House, 1992) [15]. En este caso, dicha reacción estaría relacionada con el hierro disuelto desde el mineral.

FIGURA 21. Efecto de la concentración de cianuro y del % sólidos en la disolución de plata.





De este segundo estudio se seleccionan, entonces, como las mejores condiciones para la cianuración:  $[CN^-] = 2.0 \text{ g/L}$  y 23% sólidos (300g mineral y 1000mL solución).

### 5.2.3 Efecto del tiempo sobre la cianuración del mineral

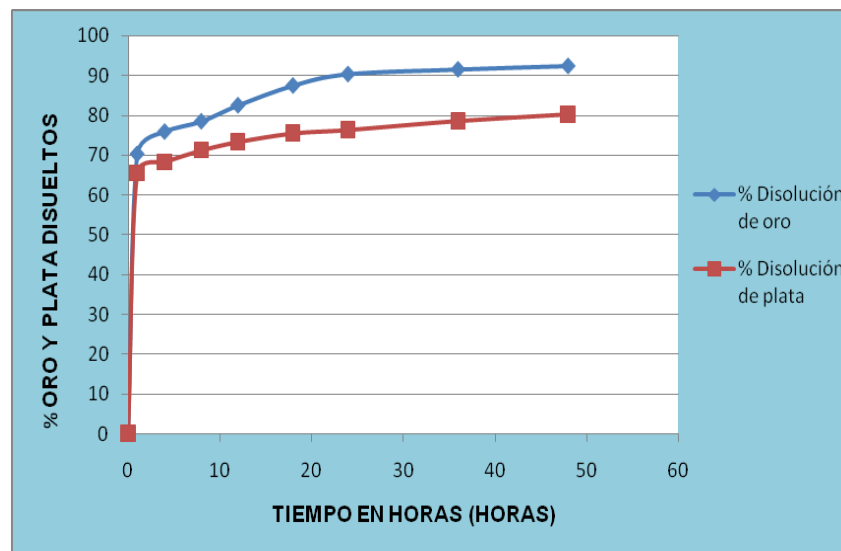
Con el fin de determinar el tiempo más adecuado de cianuración, se realizaron ensayos con tiempos de lixiviación de hasta 48 horas. Las condiciones operacionales de tales ensayos se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Condiciones operacionales de la cinética de disolución.

CONCENTRACIÓN DE CIANURO g/L	2.0
PORCENTAJE DE SÓLIDOS	23
pH	11
TIEMPO (HORAS)	1, 4, 8, 12, 18, 24, 36, 48
VELOCIDAD DE AGITACIÓN	300 r.p.m

Las curvas cinéticas de disolución de oro y plata se muestran en la figura 22.

FIGURA 22. Curvas cinéticas de disolución de oro y plata.



Se observa claramente la presencia de por lo menos dos zonas cinéticas, la primera durante tiempos cortos (1 hora), donde la cinética de lixiviación es muy rápida, disolviéndose aproximadamente 70% del oro y 65% de la plata presentes en el mineral.

A partir de dicho tiempo (1 hora) la pendiente de la curva cambia bruscamente, disolviéndose tan sólo 22% más de oro y 15% de plata en 47 horas.

Tal comportamiento podría estar relacionado con la formación de productos pasivantes sobre la superficie del mineral o, simplemente, deberse al agotamiento del reactante sólido, es decir partículas de oro libre. Se descarta como causa de la segunda zona cinética el agotamiento de reactante líquido ( $\text{CN}^-$ ), dado que durante los ensayos se controló su concentración en 2.0 g/L.

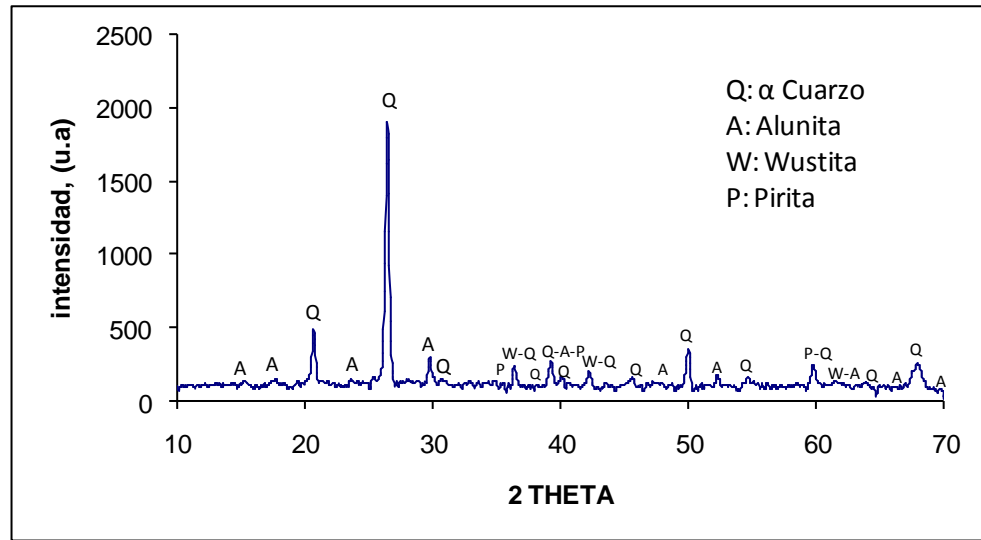
#### **5.2.4 Caracterización de los residuos sólidos (colas) de cianuración**

Con miras a determinar los cambios morfológicos, químicos y mineralógicos de las partículas de mineral durante la cianuración, las colas de tal proceso se caracterizaron con ayuda de las técnicas de FRX, DRX y SEM-EDS. A continuación se presentan los análisis correspondientes a las colas del ensayo de cianuración realizado bajo las siguientes condiciones: 23% sólidos, 2.0 g  $\text{CN}^-/\text{L}$ , pH=11, 300 r.p.m y 24 horas de lixiviación, para el cual se alcanzó una disolución del 90% del oro y 77% de la plata aproximadamente.

- **Difracción de rayos X**

De acuerdo con el difractograma de los residuos sólidos (figura 10), no se evidencia la formación de productos pasivantes causantes de la lenta cinética de cianuración a los tiempos mayores (1-24 horas). Es decir las fases cristalinas presentes son las mismas del mineral original (ver figura 10): Cuarzo, alunita, wustita y pirita.

FIGURA 23. Difractograma de las colas de cianuración.



Estos resultados parecen corroborar la hipótesis de que la zona de cinética lenta en los ensayos de cianuración es debida al agotamiento de las partículas libres de oro y plata. Lo cual implicaría que la porción de metales preciosos no disueltos esta ocluida dentro de los granos de las diferentes fases cristalinas del mineral.

- Microscopía Electrónica de Barrido

En la figura 24 se presenta una micrografía SEM de los residuos sólidos de cianuración. Con ayuda del mapeo elemental por EDS (figura 25) se pudo identificar partículas correspondientes a las cuatro especies cristalinas presentes: Cuarzo, alunita, wustita y pirita.

FIGURA 24. Micrografía SEM (500X) de las colas de cianuración.

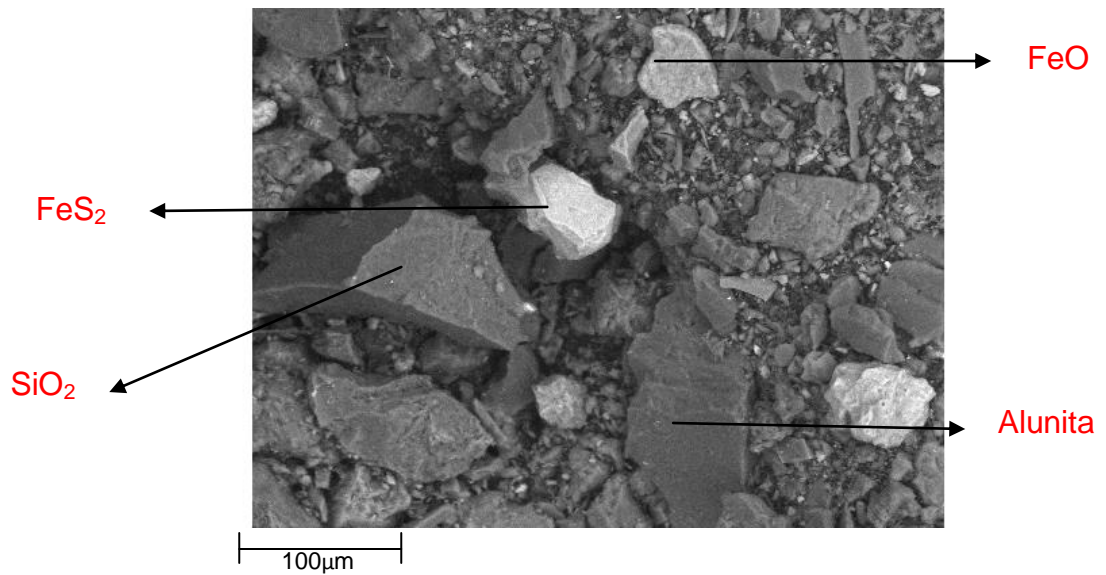
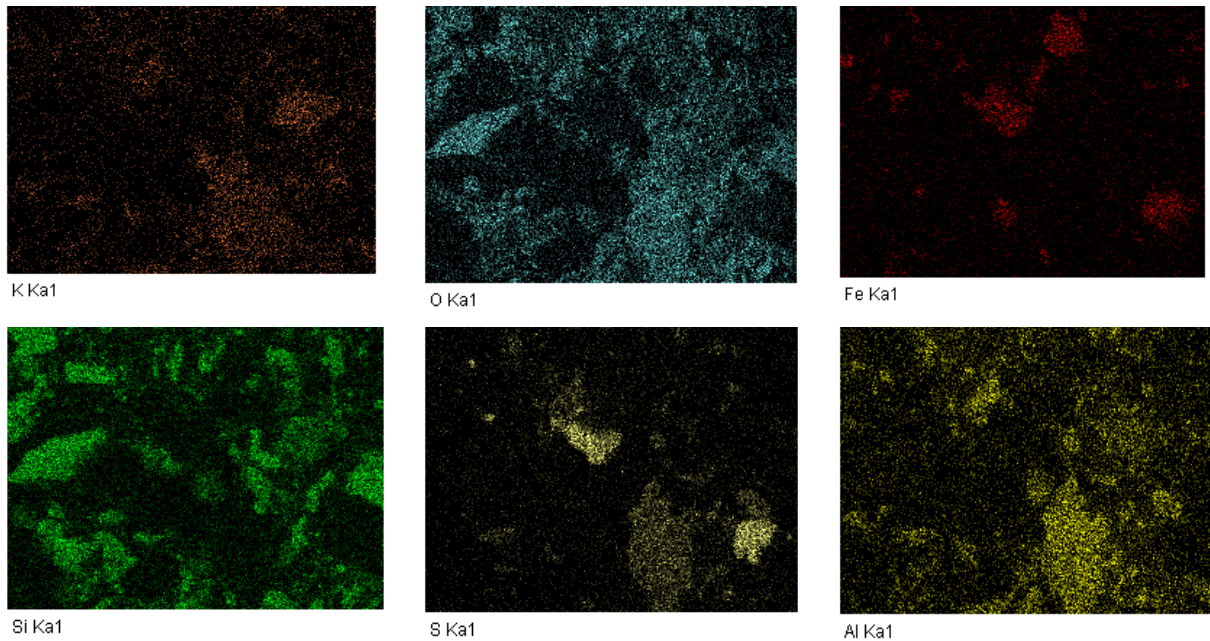


FIGURA 25. Mapeo de elementos presentes en las colas de cianuración.



Teniendo en cuenta que las micrografías SEM y los difractogramas no evidencian cambios morfológicos importantes en las partículas minerales (ver figura 8), tal como presencia de productos sólidos de lixiviación que formen capas pasivantes, se puede concluir que la ralentización, con el tiempo, del proceso de lixiviación del mineral es

debida al agotamiento de las partículas de oro y plata libres ó de fácil acceso a la solución lixivante.

- Fluorescencia de rayos X

El análisis elemental FRX del mineral luego de su cianuración (Tabla 10) revela algunas diferencias composicionales con respecto al mineral original (ver tabla 4). En general se aprecia una ligera disminución de la concentración de la mayoría de los principales elementos del mineral (Al, S, Fe y K), lo cual puede ser debido a una incipiente disolución de las partículas de pirita, wustita y alunita en el mineral.

Por su parte, el contenido de silicio aumentó, lo cual está en concordancia con la disminución de materia por la disolución de las diferentes especies.

Tabla 10. Análisis por FRX de las colas de cianuración.

Nombre	Analito (óxido)	Resultado	Analito	Resultado	Des. Estándar
Silicio	SiO <sub>2</sub>	64.972 %	Si	30.361 %	0.128
Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.359 %	Al	7.068 %	0.083
Azufre	SO <sub>3</sub>	10.266 %	S	4.106 %	0.037
Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.772 %	Fe	4.736 %	0.017
Potasio	K <sub>2</sub> O	3.203 %	K	2.669 %	0.019
Titanio	TiO <sub>2</sub>	0.447 %	Ti	0.269 %	0.011
Plomo	PbO	0.298 %	Pb	0.276 %	0.003
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.287 %	Pb	0.124 %	0.023
Cobre	CuO	0.102 %	Cu	0.082 %	0.002
Tungsteno	WO <sub>3</sub>	0.082 %	W	0.065 %	0.003
Estroncio	SrO	0.081 %	Sr	0.069 %	0.001
Manganeso	MnO	0.065 %	Mn	0.050 %	0.003
Magnesio	MgO	0.040 %	Mg	0.024 %	0.041
Antimonio	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.014 %	Sb	0.012 %	0.002
Zinc	ZnO	0.006 %	Zn	0.005 %	0.001
Rubidio	Rb <sub>2</sub> O	0.004 %	Rb	0.004 %	<0.001
Molibdeno	MoO <sub>3</sub>	0.002 %	Mo	0.001 %	<0.001
			O	Balance %	---

Fuente: Laboratorio de fluorescencia de rayos x. Corporación Centro de Desarrollo Productivo de Joyería CDP de Joyería.

### 5.3 ESTUDIO DE ADSORCIÓN DE ORO Y PLATA CON CARBÓN ACTIVADO

Una vez establecidas las mejores condiciones operacionales para el proceso de cianuración, se procedió a realizar el estudio de adsorción de los metales con carbón activado. A continuación se presentan los resultados de esta etapa del proyecto.

#### 5.3.1 Efecto de la velocidad de agitación en la adsorción de oro y plata

En la tabla 11 se resumen las condiciones operacionales de este estudio.

**Tabla 11. Condiciones operacionales del estudio de la velocidad de agitación.**

pH	11
Concentración de cianuro (g/L)	2.0
Velocidad de agitación (r.p.m)	200, 300, 400, 500
Porcentaje de mineral en pulpa (%)	23
Granulometría del carbón (mm)	2-3
Concentración de carbón (g/L)	5
Tiempo máximo de adsorción (horas)	24

De acuerdo con las curvas cinéticas de adsorción (figuras 26 y 27), el aumento de la velocidad de agitación solo es positivo en el rango de 200 a 300 r.p.m, por encima de tal valor el efecto del aumento de la velocidad de agitación es negativo.

FIGURA 26. Curvas cinéticas de adsorción de oro para diferentes valores de agitación.

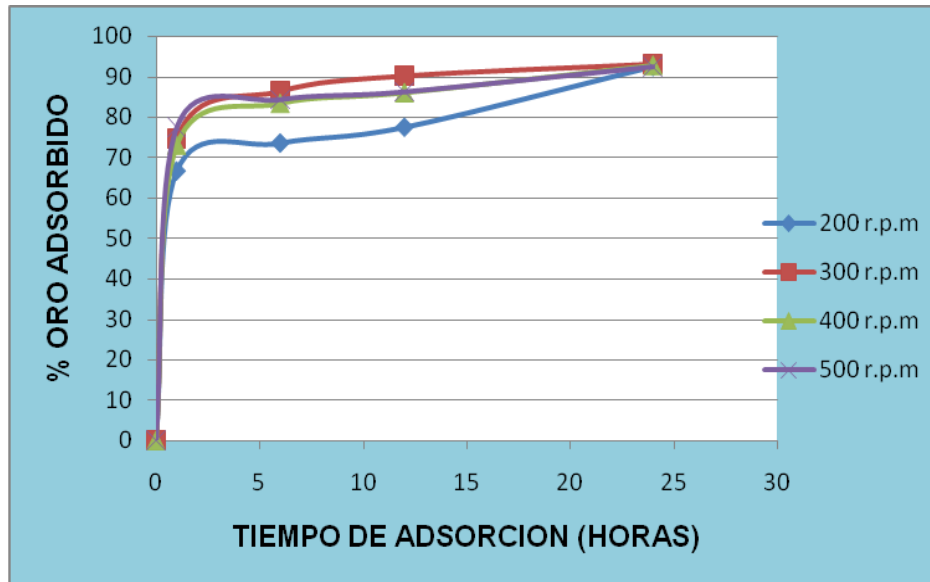
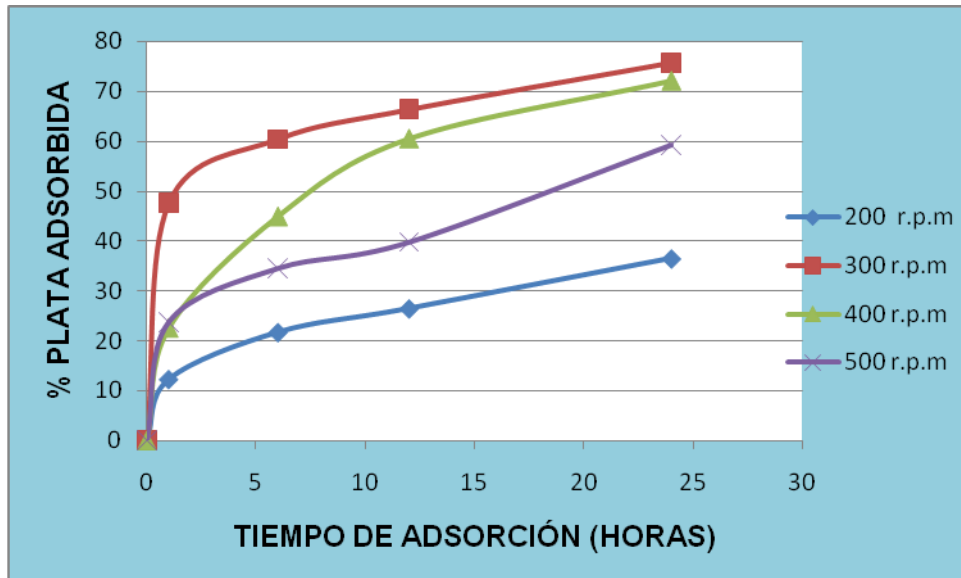


FIGURA 27. Curvas cinéticas de adsorción de plata para diferentes valores de agitación.



Este comportamiento se explica por el hecho de que a 300 r.p.m se maximiza la difusión de especies disueltas en la superficie del carbón, mientras que al aumentar demasiado la velocidad de agitación ocurren choques entre partículas de mineral y de carbón, obstaculizando el acceso de la solución a los poros del carbón, también

puede suceder que algunas partículas finas del mineral queden atrapadas en los macroporos del carbón.

Teniendo en cuenta estos resultados los siguientes ensayos se realizaron con una velocidad de agitación de 300 r.p.m.

### 5.3.2 Efecto de la granulometría del carbón y de la relación carbón/solución en la adsorción de oro y plata

Las condiciones operacionales para este primer estudio son mostrados en la tabla 12.

Tabla 12. Condiciones operacionales para el estudio de la granulometría del carbón y relación carbón/solución.

<b>pH</b>	11
<b>Concentración de cianuro (g/L)</b>	2.0
<b>Velocidad de agitación (r.p.m)</b>	300
<b>Porcentaje de mineral en pulpa (%)</b>	23
<b>Granulometría del carbón (mm)</b>	1-2 (Dp=1600µm ),2-3 (Dp=2520µm),1-3 (Dp=1680µm)
<b>Concentración de carbón (g/L)</b>	5, 2, 1.3
<b>Tiempo máximo de adsorción (horas)</b>	24

En las figuras 28 y 29 se pueden observar las curvas cinéticas del diseño experimental 2<sup>2</sup>, con repetición en el centro, del estudio, para el cual las variables respuestas fueron % adsorción de oro y plata.

FIGURA 28. Curvas cinéticas de adsorción de oro para diferentes condiciones de granulometría del carbón y relación carbón/solución.

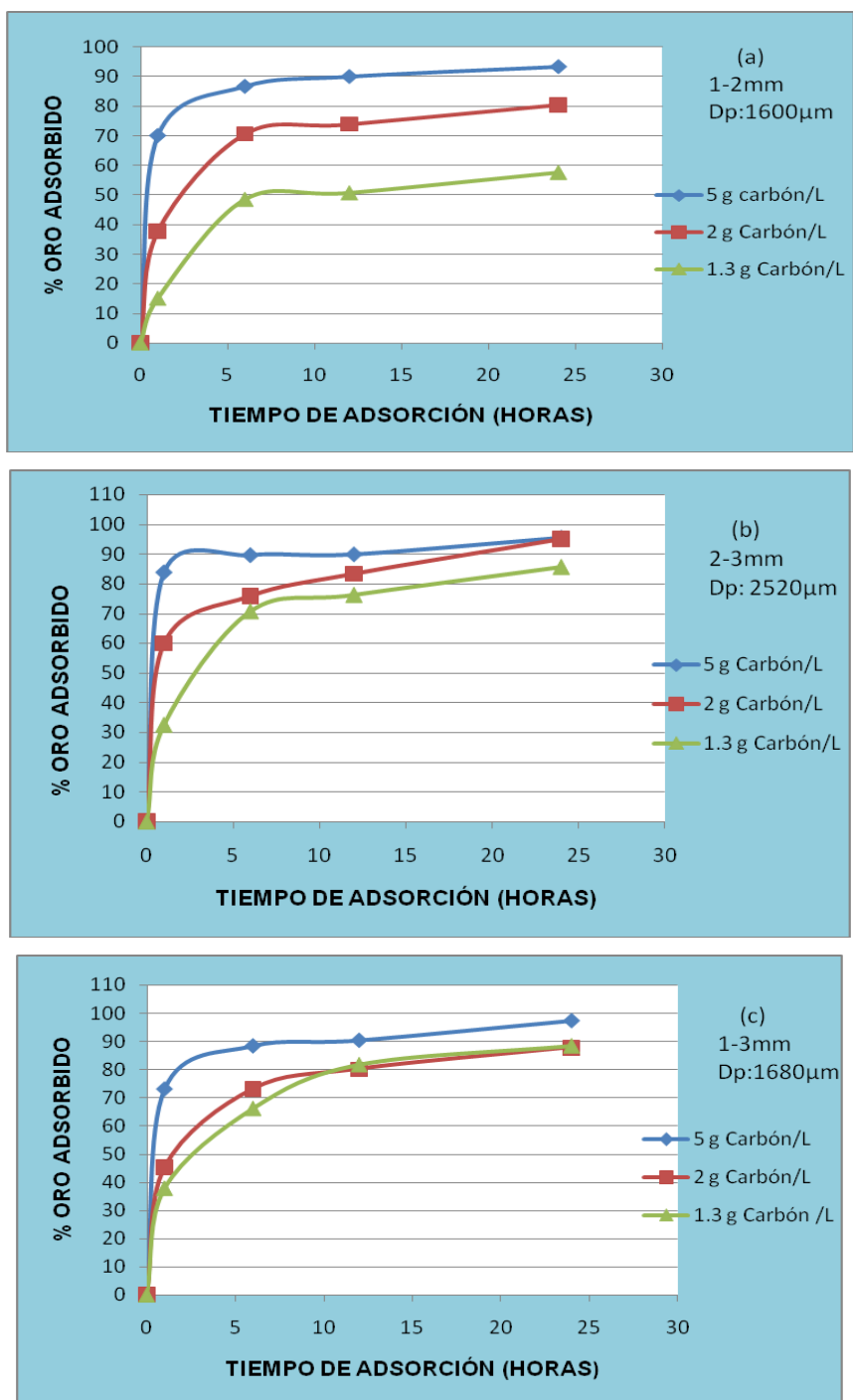
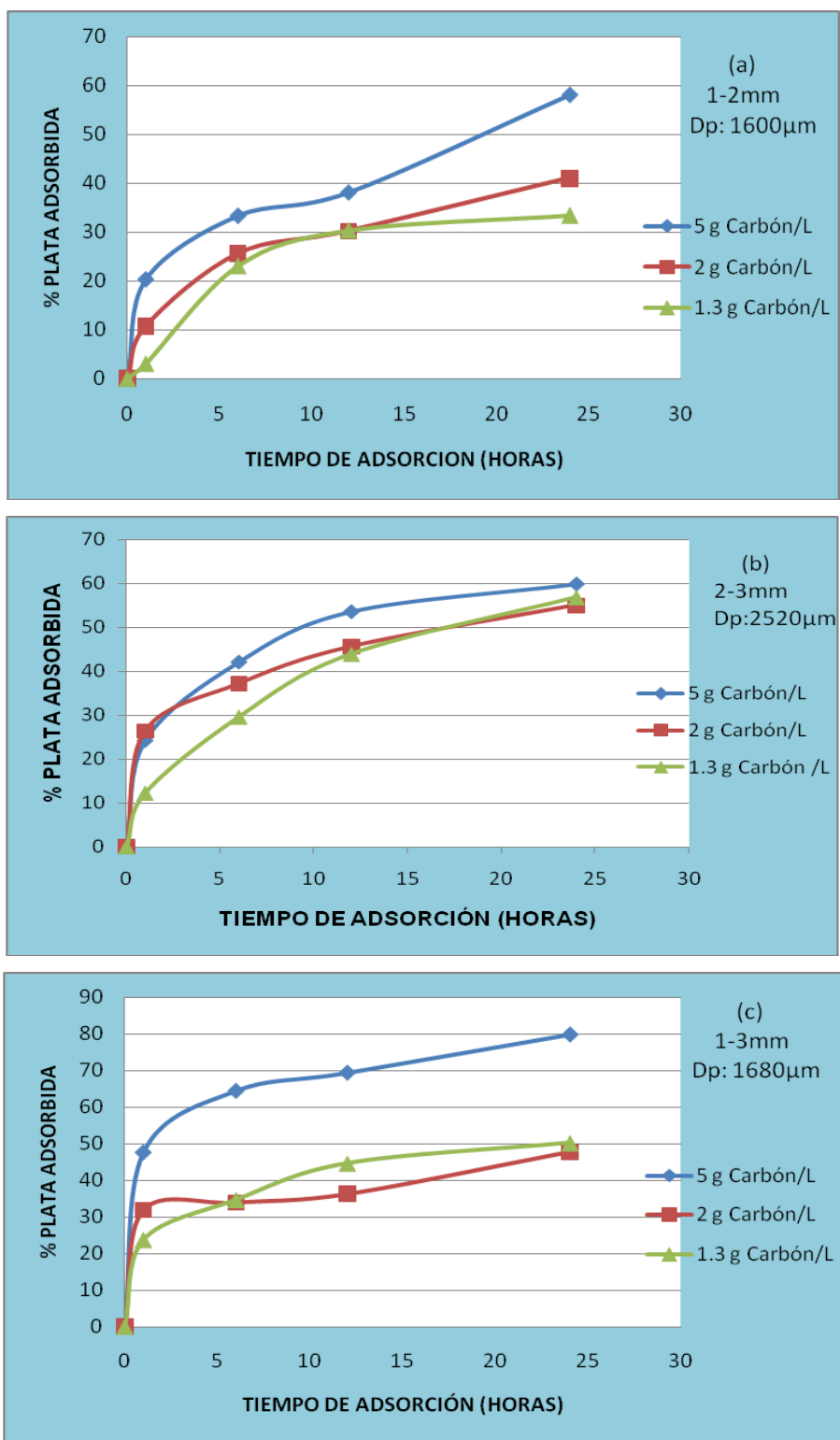


FIGURA 29. Curvas cinéticas de adsorción de plata para diferentes condiciones de granulometría del carbón y relación carbón/solución.



Como era de esperarse, el aumento de la relación g carbón/L de solución aumenta la cinética de adsorción de los metales preciosos. Aunque esto fue así para los tres rangos granulométricos del carbón, tal comportamiento fue más evidente para la fracción granulométrica de 1-2mm (figura 28a), pasándose de aproximadamente 57% de oro adsorbido, usando 1.3g carbón/L, a 93%, empleando 5 g carbón/L. Estos resultados evidencian la necesidad del uso de altas cantidades de carbón ( $\geq 5\text{g/L}$ ) si se desean recuperar los metales preciosos en una sola etapa, o aplicación del carbón activado en bajas cantidades ( $\leq 2\text{g/L}$ ) pero en varias etapas de adsorción.

La variable granulometría del mineral también afecta la cinética de adsorción, aunque en menor medida. Esta variable parece tener mayor importancia para bajas concentraciones de carbón que para altas, por ejemplo: para una relación de 1.3 g carbón/L se pasa de 57% Au adsorbido con carbón con  $D_p = 1.6\text{mm}$  (fracción de 1-2mm) a 85% con carbón grueso,  $D_p = 2.52\text{mm}$  (fracción de 2-3mm). Mientras que tales valores de adsorción para una alta concentración de carbón (5 g/L) son muy parecidos 93 y 95% respectivamente.

Este comportamiento concuerda con los valores de área superficial específica determinados para las diferentes distribuciones del carbón (ver tabla 6):  $678.0133\text{ m}^2/\text{g}$  para la fracción de 1-2 mm,  $891.8383\text{ m}^2/\text{g}$  para la fracción de 2-3 mm y  $890.8035\text{ m}^2/\text{g}$  para la fracción de 1-3 mm.

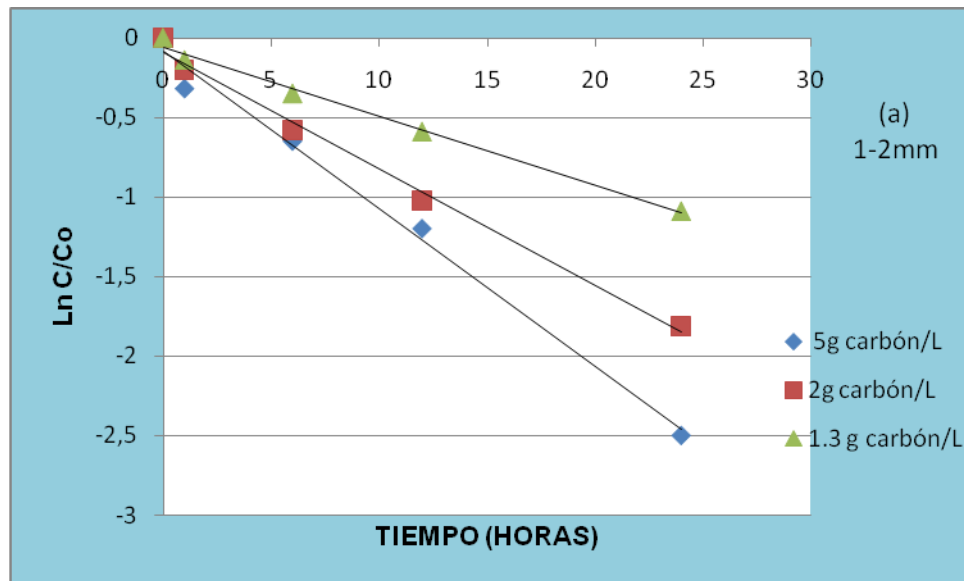
Con miras a dilucidar el efecto sinérgico de estas dos variables sobre la cinética de adsorción de los metales, se aplicó el programa Statgraphics Centurión al diseño experimental en discusión. Las variables respuesta usadas para tales cálculos fueron las constantes cinéticas de adsorción del oro y de la plata, las cuales fueron determinadas linealizando las curvas cinéticas con una función exponencial de pseudo- primer orden [16].

$$C = C_0 e^{-Kt}$$

o bien:  $\ln(C/C_0) = -Kt$

Donde  $C_0$  es la concentración inicial de Au ó Ag,  $C$  la concentración del metal a un tiempo de adsorción  $t$  y  $K$  la constante cinética. Las curvas cinéticas linealizadas de esta forma se presentan en las figuras 30 y 31 y las constantes cinéticas, junto con sus respectivos coeficientes de correlación ( $R^2$ ), se muestran en la tabla 13.

FIGURA 30. Linealización de las cinéticas de adsorción de oro.



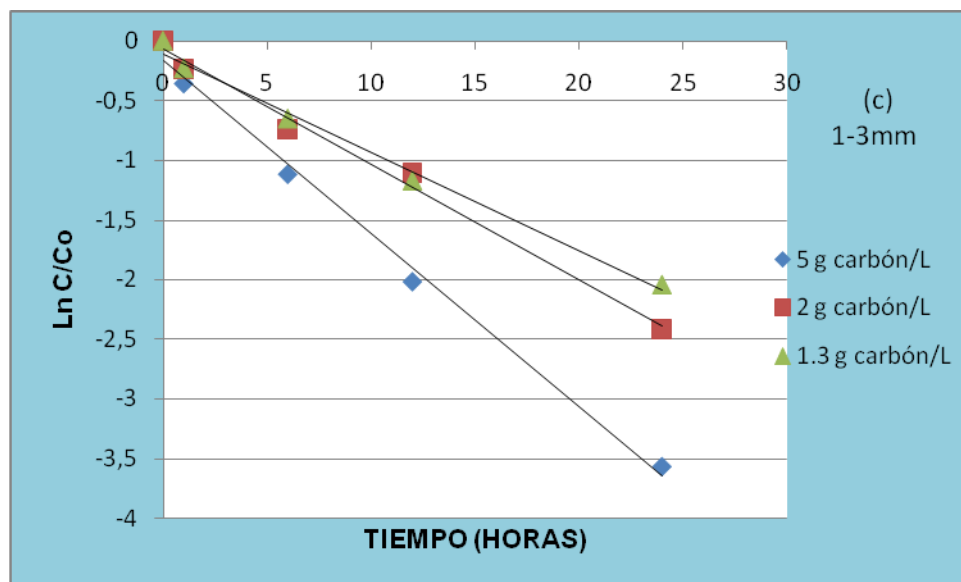
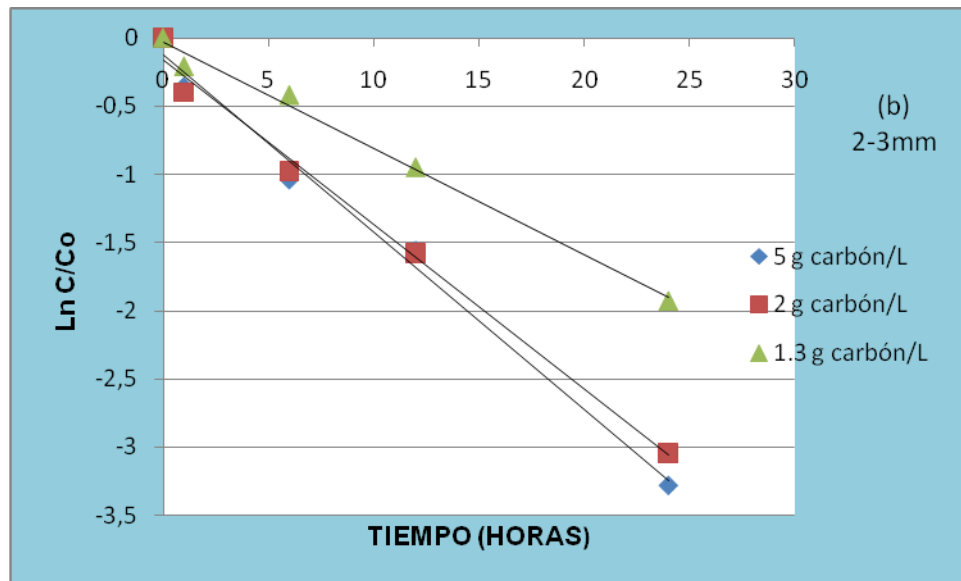


FIGURA 31. Linealización de las cinéticas de adsorción de plata.

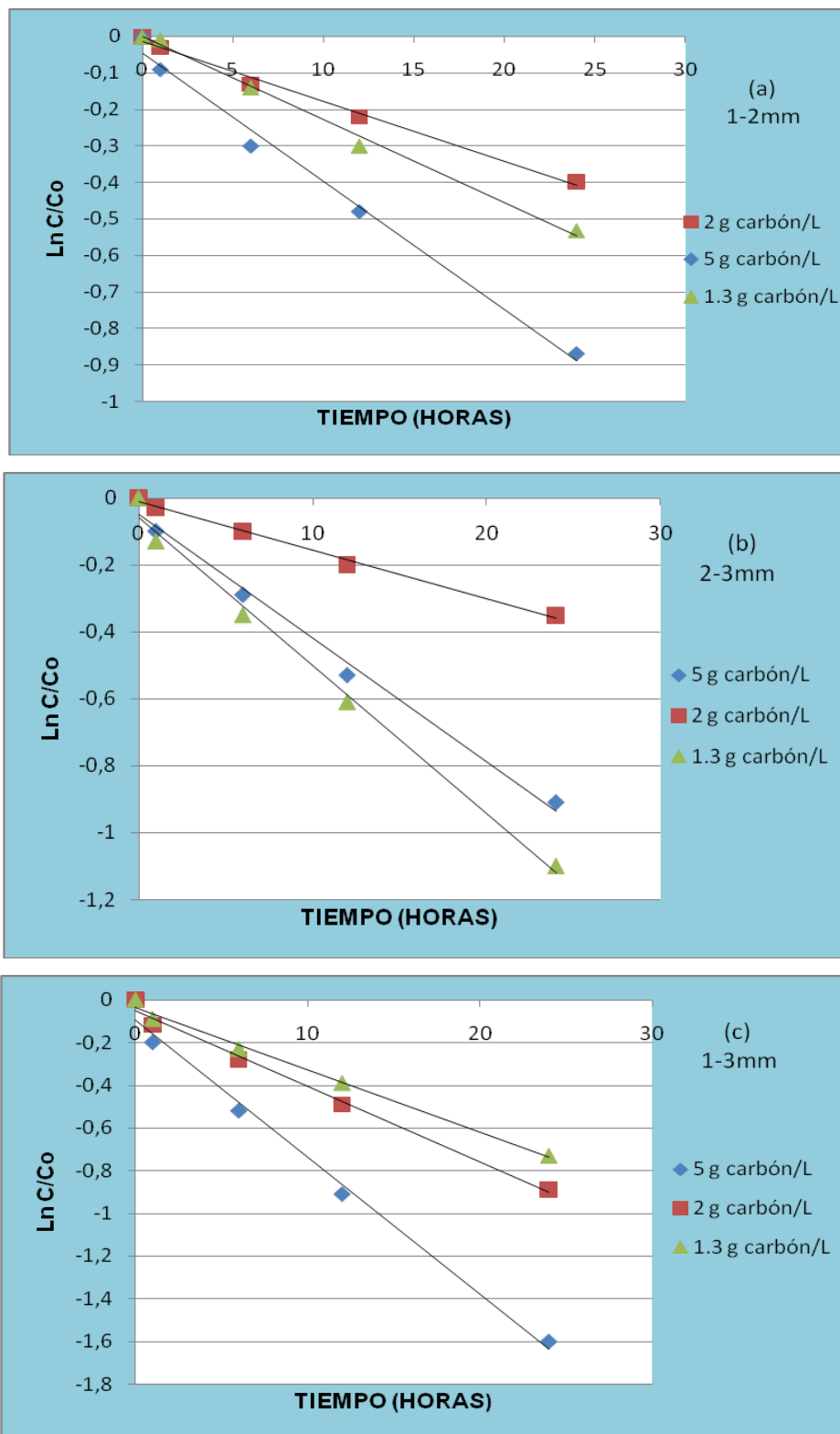


Tabla 13. Constantes cinéticas de pseudo-primer orden para el estudio de adsorción de Au y Ag.

[ CARBÓN] (g/L)	Dp carbón (mm)	Au		Ag	
		K (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	K (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
5	1.6	0.099	0.990	0.035	0.990
2	1.6	0.073	0.991	0.016	0.991
1.3	1.6	0.043	0.992	0.022	0.992
5	2.52	0.130	0.993	0.036	0.993
2	2.52	0.120	0.991	0.014	0.991
1.3	2.52	0.078	0.990	0.044	0.990
5	1.7	0.145	0.993	0.064	0.993
2	1.7	0.096	0.990	0.035	0.990
1.3	1.7	0.082	0.991	0.029	0.991

Los valores de R<sup>2</sup> próximos a la unidad, demuestran un buen ajuste de los datos al modelo cinético de pseudo- primer orden. A continuación se describe el estudio estadístico realizado con ayuda del programa STATGRAPHIC.

En primer lugar y con ayuda de un análisis de regresión multifactorial, se obtuvieron las ecuaciones que relacionan las variables dependientes (concentración y granulometría del carbón) con cada una de las variables independientes (constantes cinéticas para la adsorción de oro y plata):

$$K_{Au} = -0,0133865 + 0,0221597 * [\text{carbón}] + 0,0371878 * Dp \text{ carbón} - 0,0044114 * [\text{carbón}] * Dp \text{ carbón}$$

$$K_{Ag} = -0,0143918 + 0,0177727 * [\text{carbón}] + 0,0174631 * Dp \text{ carbón} - 0,00668613 * [\text{carbón}] * Dp \text{ carbón}$$

Donde: K<sub>Au</sub> y K<sub>Ag</sub> son las constantes cinéticas de adsorción (min<sup>-1</sup>) respectivamente. [Carbón] es la concentración de carbón activado en la pulpa (g/L solución). Dp carbón es el tamaño medio de las partículas de carbón (mm).

Las ecuaciones anteriores se ajustan a los resultados obtenidos con un 95% de confianza en ambos casos. Posteriormente, se obtuvieron los diagramas de Pareto y las gráficas del efecto de las variables sobre las constantes de adsorción. Tales resultados se presentan en las figuras 32 a 35.

FIGURA 32. Diagrama de Pareto para Au.

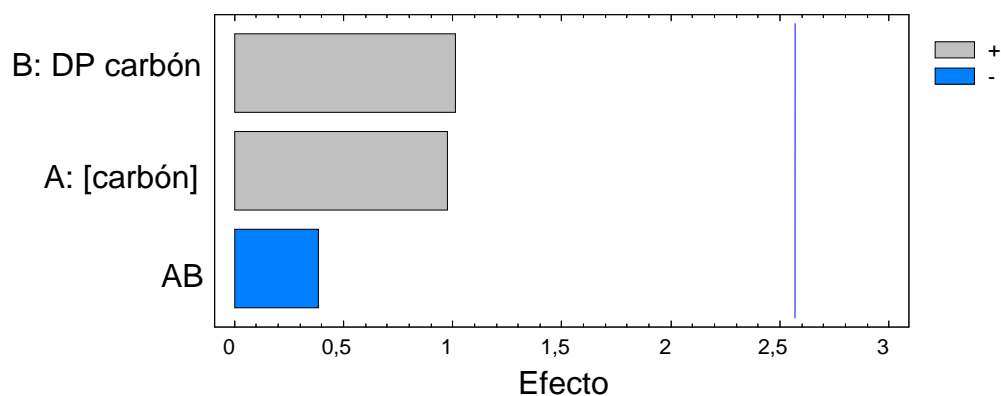


FIGURA 33. Gráfica de efectos principales para  $K_{Au}$ .

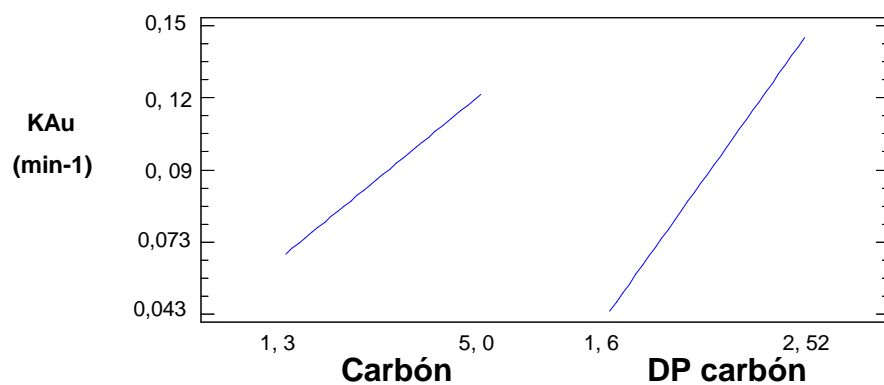


FIGURA 34. Diagrama de Pareto para el Ag.

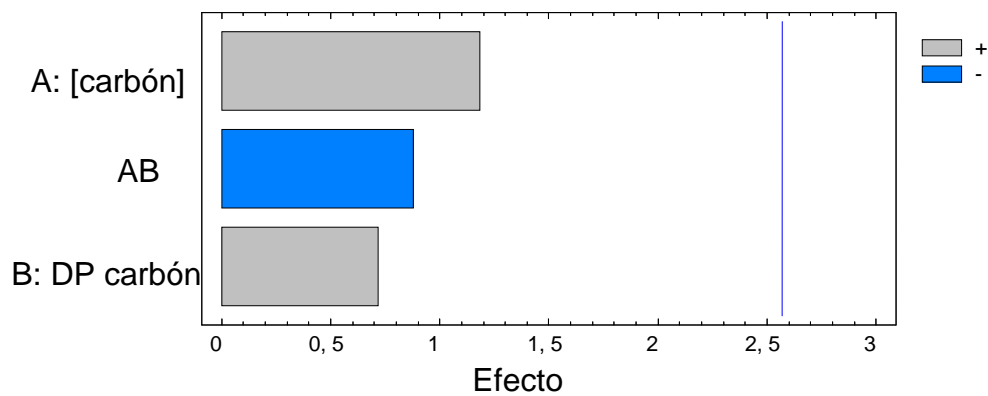
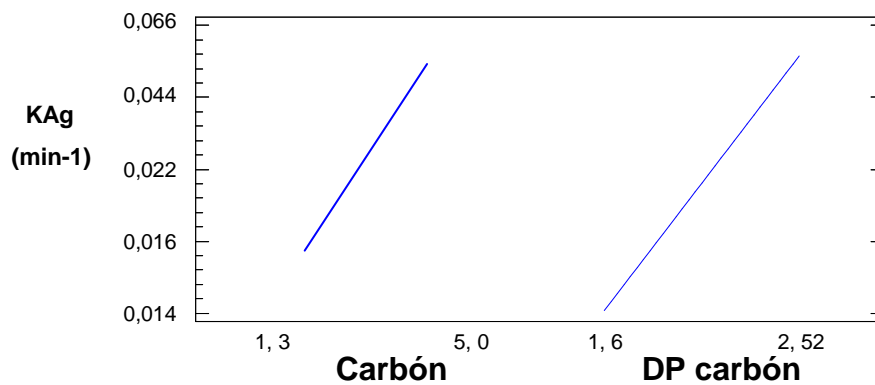


FIGURA 35. Gráfica de efectos principales para  $K_{Ag}$ .



De acuerdo con las gráficas de Pareto y de efectos principales (figuras 32 a 35), las variables [carbón] y Dp carbón tienen un efecto positivo sobre las constantes cinéticas de adsorción de oro y plata, pero su interacción o variación conjunta genera un efecto negativo en la cinética de adsorción. No obstante, se observa que para la adsorción de oro las dos variables (por separado) tienen prácticamente la misma importancia, mientras que para la adsorción de plata es mucho mayor el efecto de la variable concentración de carbón que la de tamaño de partícula. Esto último puede deberse a la notable diferencia en la concentración de los dos metales en solución (4.6 ppm Au y 42 ppm Ag).

### 5.3.3 Efecto del tiempo en la adsorción de oro y plata sobre el carbón activado

Las condiciones operacionales para este estudio se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Condiciones operacionales para el estudio del efecto del tiempo en la adsorción de Au y Ag.

<b>pH</b>	11
<b>Concentración de cianuro (g/L)</b>	2.0
<b>Velocidad de agitación (r.p.m)</b>	300
<b>Porcentaje de sólidos (%)</b>	23
<b>Granulometría del carbón (mm)</b>	2-3
<b>Concentración de carbón (g/L)</b>	5
<b>Tiempo de adsorción (horas)</b>	1, 4, 8, 12, 18, 24, 36, 48

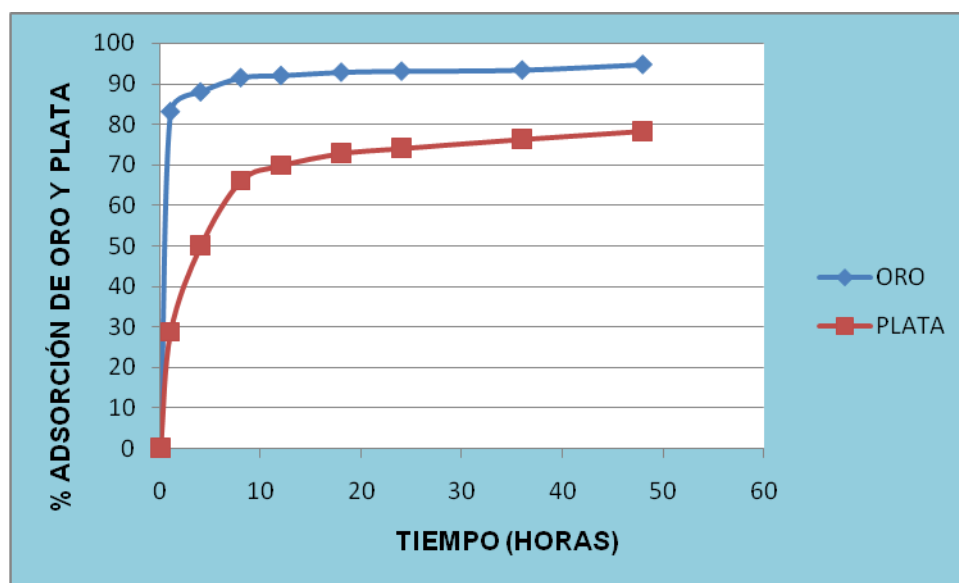
Los resultados de este estudio se muestran en la figura 36. Tal como se había observado en los ensayos de adsorción previos, las curvas cinéticas presentan dos zonas: una de rápida cinética a tiempos cortos (1 hora para el oro y 8 horas para la plata) y otra cinética muy lenta para tiempos mayores.

Teniendo en cuenta estos resultados, se podría decir que los niveles máximos de adsorción de oro y plata se alcanzan al cabo de 8 y 24 horas respectivamente. Por lo

tanto se selecciona 24 horas como el tiempo más adecuado para el proceso de adsorción de los metales preciosos.

Llevar el tiempo de contacto a 48 horas implica costos económicos que posiblemente no podrían ser compensados con la recuperación adicional de 1.63% de oro y 4.25% de plata.

FIGURA 36. Cinéticas de adsorción de Au y Ag durante 48 horas.



#### 5.3.4 Caracterización del carbón cargado con metales preciosos

- Espectroscopia de infrarrojos con transformada de Fourier

Los espectros IR para las muestras de carbón, antes y después de la adsorción de los metales preciosos, son presentados en las figura 37(a, b). En ellos se puede identificar los grupos funcionales del carbón asociados a las bandas de adsorción. La amplia banda entre 3000 y 3750  $\text{cm}^{-1}$  está asociada al estiramiento axial de los grupos OH (Gonzales, 2008)[17].

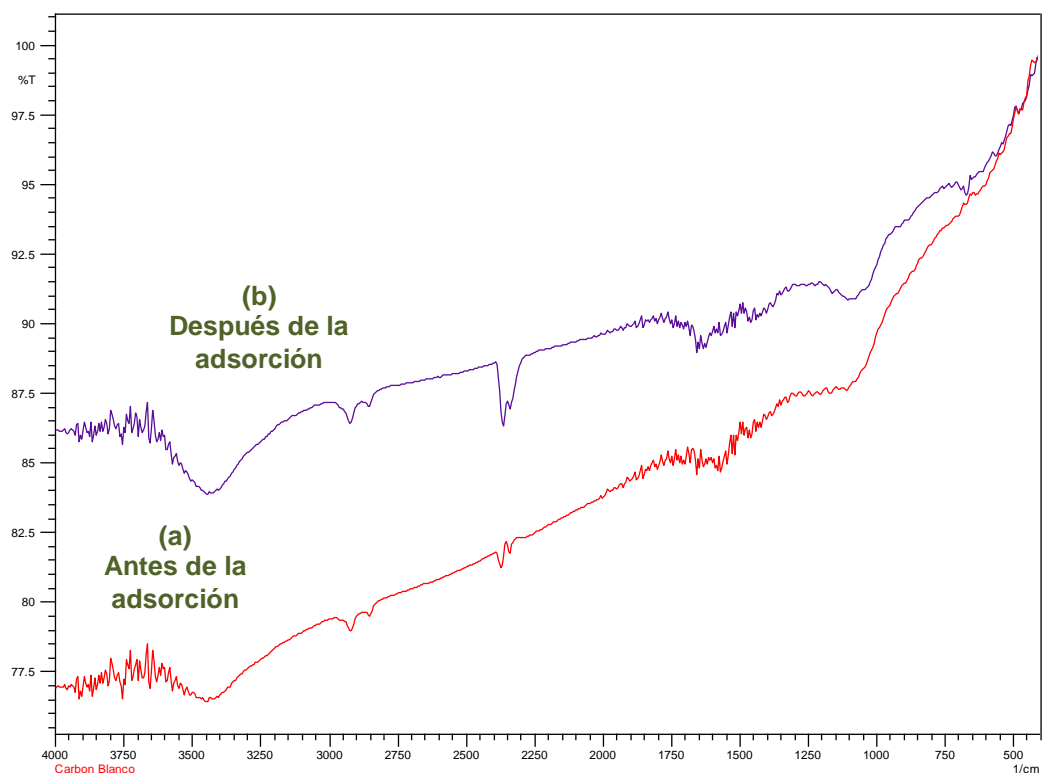
Las bandas entre 2800 y 2950  $\text{cm}^{-1}$  pueden ser asociadas a la vibración asimétrica de los grupos CH, CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub>. Las bandas entre 2300 y 2400  $\text{cm}^{-1}$ , no son

importantes en el análisis, ya que son típicas de los análisis FT-IR y corresponden a la presencia de CO<sub>2</sub> (Chen et.al., 2003)[18]. Por su parte, las pequeñas bandas entre 1400 y 1750 cm<sup>-1</sup> caracterizan el estiramiento de los grupos carbonilo (C=O) y C=C, que pueden indicar la presencia de cetonas, esterés, aldehídos y ácidos carboxílicos.

Entre 1000 y 1200 cm<sup>-1</sup> aparece una ancha banda correspondiente al estiramiento del grupo funcional C-O. Finalmente aparece una banda a 670 cm<sup>-1</sup>, correspondiente a la flexión del enlace C-C.

Teniendo en cuenta los cambios más importantes en tales bandas, se puede inferir que la adsorción de los metales en el carbón está asociada a los grupos funcionales C-O y C-C, relacionados con las bandas entre 1000 y 1200 cm<sup>-1</sup> y a 670 cm<sup>-1</sup> respectivamente, las cuales son intensificadas por acción de la adsorción de los metales.

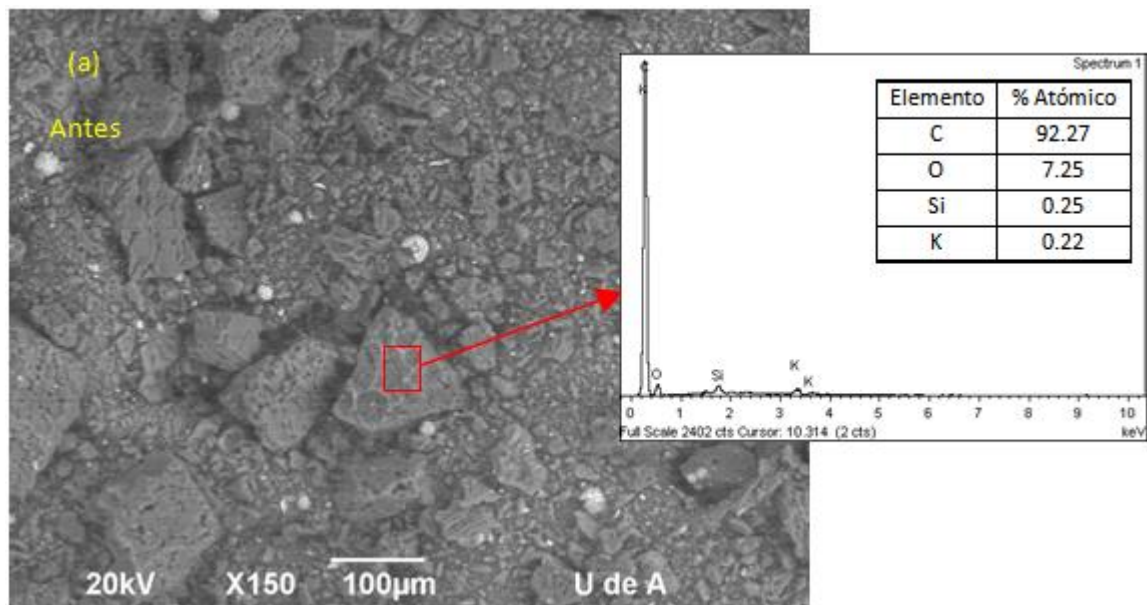
FIGURA 37. Espectros IR del carbón antes y después de la adsorción de oro y plata.

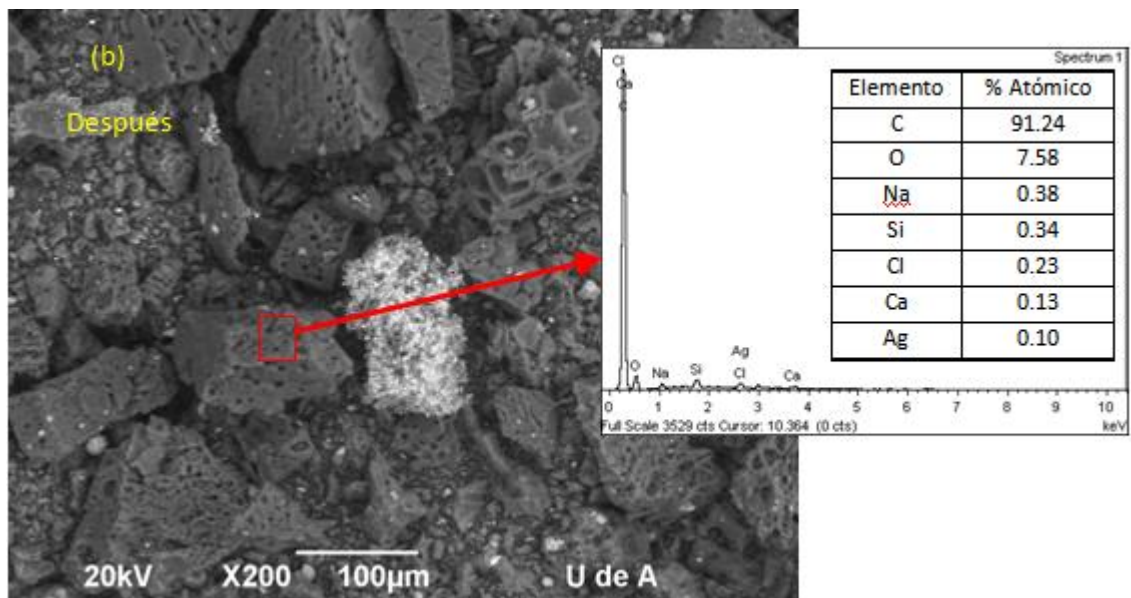


- Microscopía Electrónica de Barrido

Aunque las micrografías SEM del carbón activado antes (figura 37a) y después (figura 37b) de la adsorción de los metales preciosos no evidencian cambios morfológicos importantes en las partículas, el análisis EDS sí ponen de manifiesto algunas diferencias químicas, relacionadas con elementos adsorbidos por el carbón, como es el caso de Na, Cl, Ca y Ag. En tales análisis no se alcanza a detectar el oro dada su baja concentración.

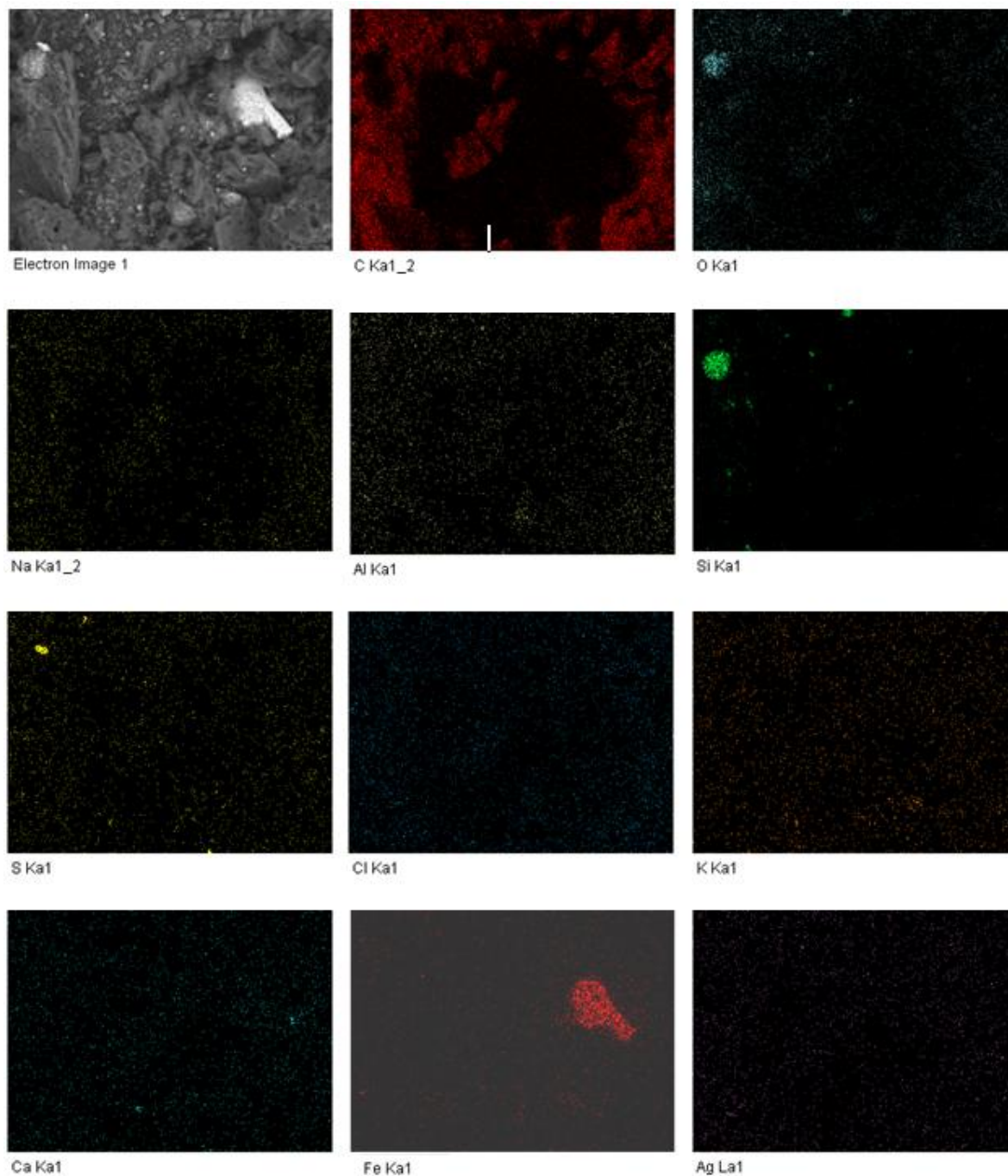
FIGURA 37. Micrografías SEM y Espectros EDS de las muestras del carbón antes y después de la adsorción de oro y plata.





El mapeo de elementos por EDS (figura 38) evidencia la adsorción de hierro además de la plata, lo que permite concluir que la adsorción del oro sobre el carbón está limitada por la competencia de la plata y el hierro por los sitios activos del carbón.

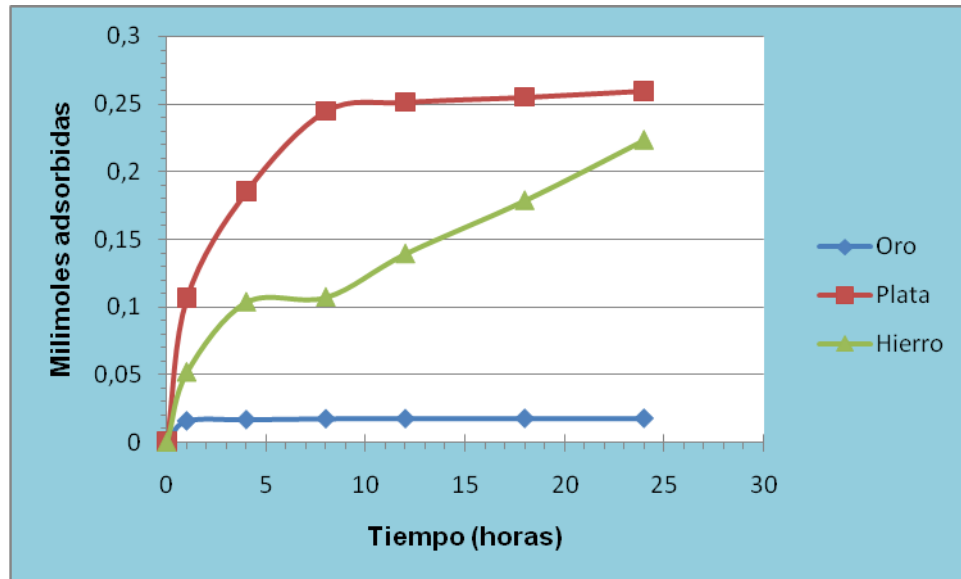
FIGURA 38. Mapeo elemental por EDS del carbón luego del proceso de adsorción de oro y plata.



Teniendo en cuenta la importancia de este hecho sobre la eficiencia del proceso de recuperación de oro con el carbón, se calculó mediante las medias de oro, plata y hierro disuelto, por espectroscopia de adsorción atómica, la cantidad de estos metales adsorbidos en el carbón.

En la figura 39 se muestra la variación con el tiempo de las moles adsorbidas de los tres metales.

FIGURA 39. Variación con el tiempo de las moles de metales adsorbidos.



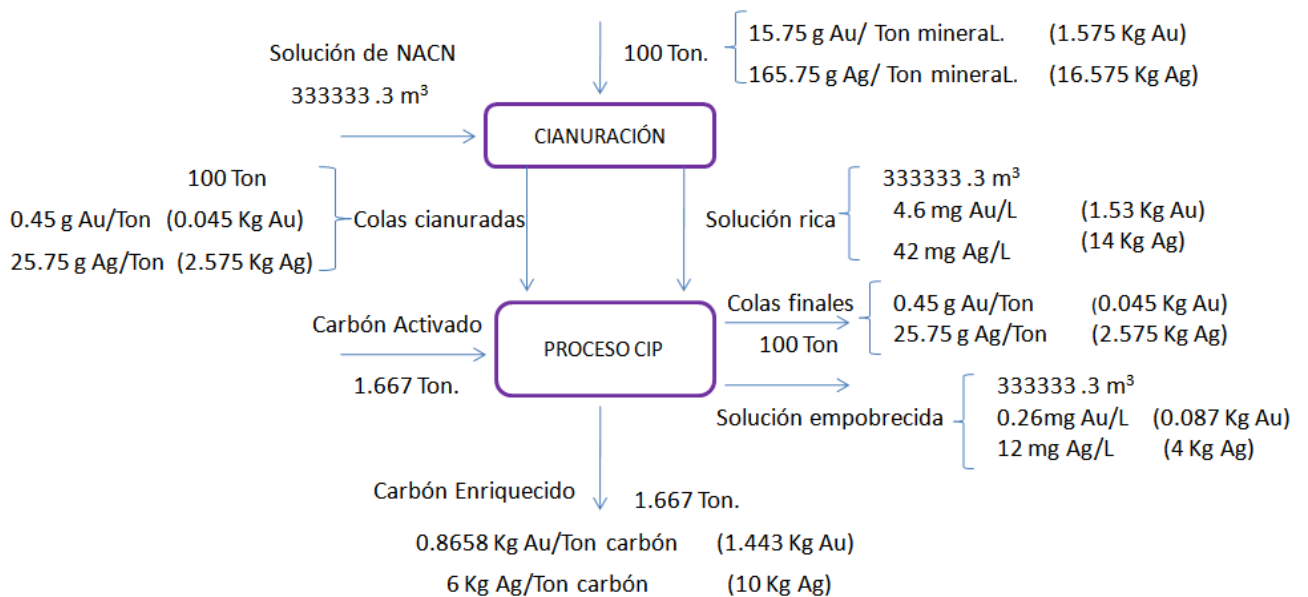
Se observa que al cabo de 24 horas, la adsorción de oro, plata y hierro es 0.017, 0.260 y 0.224 milimoles respectivamente. Es decir se adsorbe 15 veces más moles de plata que de oro y 13 veces más moles de hierro que de oro. Esto quiere decir que tan solo el 3.4% de las moles metálicas adsorbidas corresponden a oro.

No obstante las anteriores cifras, se puede concluir que el proceso de recuperación de metales preciosos por el método de carbón en pulpa es viable desde un punto de vista tecnológico, dado que los resultados demuestran que se logra recuperar por este método, aproximadamente, el 93% del oro y el 70% de la plata disueltos, y ésto con una sola etapa de adsorción.

### 5.3.5 Balance de materia para los procesos de cianuración y adsorción de oro y plata en una sola etapa

En la figura 40 se resume el balance de materia para los procesos de cianuración por agitación y adsorción de metales con carbón activado para las colas de concentración de la empresa minera La Baja.

FIGURA 40. Balance de materia para los procesos de cianuración y adsorción de oro y plata.



De acuerdo con dicho balance, por cada 100 toneladas de mineral alimentado se lograría disolver 1.53 kg de oro y 14 kg de plata, de los cuales se adsorberían en el carbón el 93 y 70% respectivamente, es decir: 1.443 kg de oro y 10 kg de plata. De esta forma el carbón quedaría cargado con 0.8658 kg Au/ton y 6 kg Ag/ton.

Por todo lo anterior, se concluye que el proceso propuesto para el tratamiento del mineral es viable desde un punto de vista técnico. No obstante, la eficiencia de adsorción se puede mejorar implementando más de una etapa de adsorción.

## 6. CONCLUSIONES

- De las pruebas de cianuración por agitación se puede deducir que las mejores condiciones operacionales del proceso son:  $[\text{CN}^-] = 2.0\text{g/L}$ ,  $\text{pH}=11$ , Velocidad de agitación de 300 r.p.m, % mineral en pulpa de 23.
- En cuanto al efecto de la concentración de cianuro, los resultados indican que el aumento de concentración de  $\text{CN}^-$  de 1.5 a 2.0 g/L favorece la disolución de los metales preciosos. Concentraciones mayores de cianuro producen un efecto adverso debido al favorecimiento de reacciones de formación de cianocomplejos metálicos, que para esta investigación corresponden a complejos de hierro.
- Durante la lixiviación de oro y plata del mineral se presentan dos zonas cinéticas, la primera durante tiempos cortos (1 hora), donde la cinética de lixiviación es muy rápida, disolviéndose aproximadamente 70% del oro y 65% de la plata presentes en el mineral. A partir de dicho tiempo (1 hora) la pendiente de la curva cambia bruscamente, disolviéndose tan solo 22% más de oro y 15% de plata en 47 horas.
- Las mejores condiciones obtenidas de los ensayos de adsorción con carbón activado en pulpa fueron: Velocidad de agitación de 300 r.p.m, Relación carbón/solución de 5g/L y una granulometría del carbón de 2-3mm.
- La velocidad de agitación con la que se obtiene la mayor adsorción de metales es 300 r.p.m, ya que con ella se maximiza la difusión de especies disueltas a la superficie del carbón. Mayores velocidades de agitación producen choques

entre las partículas de mineral y carbón, los cuales disminuyen el contacto de la solución con el carbón, por lo que se disminuye la cinética de adsorción.

- El aumento de la relación g carbón/L de solución aumenta la cinética de adsorción de los metales preciosos. Por tanto, se concluye que si se desean recuperar los metales preciosos en una sola etapa, es necesario el uso de altas concentraciones de carbón ( $\geq 5\text{g/L}$ ).
- Del estudio estadístico de los resultados de adsorción, se concluye que las dos variables, concentración y tamaño de partícula del carbón, tienen un efecto positivo sobre las constantes cinéticas de adsorción de oro y plata, pero su interacción o variación conjunta genera un efecto negativo en la cinética de adsorción.
- El balance de materia del proceso cianuración por agitación-adsorción de oro y plata sobre carbón activado, permite establecer que la eficiencia de la etapa de cianuración es de 90.38% para el oro y 76.28% para la plata. Mientras que las eficiencias de la etapa de adsorción son 93 y 70% respectivamente.
- Finalmente, se concluye que el proceso extractivo propuesto para los lodos de concentración de la mina “La Baja” es técnicamente viable, aunque las eficiencias son susceptibles de mejoras implementando un proceso de adsorción en múltiples etapas.
- La incorporación de la variable ambiental en todos los procesos investigativos de los miembros de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, ratifica el compromiso de formación integral de sus egresados, como aporte fundamental para la construcción e implementación de procesos productivos sostenibles ambientalmente.

## 7. RECOMENDACIONES

- Con base en los buenos resultados obtenidos en este trabajo, se recomienda realizar estudios a nivel de escala piloto para corroborar o ajustar los niveles de las variables operacionales. De tal forma que el proceso sea eficiente a escala industrial.
- Se recomienda complementar el estudio de adsorción de oro y plata sobre carbón activado teniendo en cuenta otras variables importantes en el proceso, tales como: concentración de cianuro, pH y número de etapas de adsorción.
- Se recomienda llevar a cabo un estudio sobre la desorción del oro y la plata, dado que es imprescindible determinar las condiciones óptimas de elución de los metales adsorbidos, con las cuales se alcance una alta recuperación de los mismos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

[1] DOMIC, M.E. Hidrometalurgia. Fundamentos, procesos y aplicaciones. Editorial: Andros Impresores Ltda. Chile, 2001.

[2] BUSTAMANTE, R.O. Programa modular. Procesamiento de minerales auroargentíferos. Modulo 6 Concentración de minerales. Convenio CIMEX, Minerales, SENA. Colombia, 1992.

[3] Álvarez Rodrigo, Estado del arte de las tecnologías de tratamiento pasivo para la disminución de cianuros de la industria minera: experiencias en Asturias. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Explotación y Prospección de Minas de. Universidad de Oviedo. Universidad de Oviedo.

[4] ALVAREZ, Rodrigo, Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de soluciones residuales de procesos de cianuración en minería de oro. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo. Departamento de Explotación, 2005.

[5] BRENT, J. H. Dissolution chemistry of gold and silver in diferent lixiviants. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. Volumen 4, 1998.

[6] Cesar Enrique Tómalá. Análisis de un sistema de adsorción de oro de carbón activado y su electrodeposición. Escuela Superior Politécnica. Tesis de grado, 1998.

[7] M. A. Mas, F. L. Aguirre y G. Amaya. Comparison of Conventional and Carbón In Pulp Leaching Processes in Gold Hydrometallurgy. Inf. Tecnol. v.16 n.5 La Serena 2005.

[8] MANRIQUE, José Antonio. Manejo de pilas de lixiviación de oro en minera Yanacocha S.R.L.

[9] K. L. Rees and J. S. J. van Deventer .The mechanism of enhanced gold extraction from ores in the presence of activated carbón. Elsevier Science B.V. All rights reserved 2001.

[10] Braz. J. Chem. J. Chem. Simulación dinámica del carbono en pulpa y el carbón en los procesos de lixiviación. Departamento de Ciencia de los Materiales y Tecnología, Universidad Federal. Vol.24 no.4 São Paulo octubre ,2007.

[11] André Sobolewski. Especies de metales indican el potencial de humedales artificiales para el tratamiento a largo plazo de drenaje de minas de metales. Tecnologías microbiana, 2252 Allison Road, Vancouver, BC, 1T6 CanadaV6T.

[12] KELLY, E.G&. SPOTTISWOOD. Introducción al procesamiento de minerales. Jhon Willey. USA, 1982.

[13] IH Plonski. Cinética de la disolución del hierro activa inhibida por hidrógeno adsorbido. Instituto de Física Atómica, IFTM, POB MG-6, RO-76900 -, Bucarest, Rumanía.

[14] M. Sc Mario Gaete M. Capacitación minera a periodistas de la región de Coquimbo.

[15] B, Solorza. Lixiviación de oro en soluciones cianuradas. Universidad Nacional de San Juan, Departamento de Ingeniería Química.

[16] P. Navarro y C. Vargas. Modelación empírica de la adsorción de oro con carbón activado desde un medio tiosulfatado-amoniaco. Revista de Metalurgia N° 42, 2006.

[17] P. Meneses. Evaluación de los Catalizadores en el Proceso Sol-Gel y su Influencia en las Propiedades Anticorrosivas de Recubrimiento Poliméricos de Circonia. Facultad de Ciencias Naturales, Matemáticas y Medio Ambiente, Universidad Tecnológica Metropolitana.

[18] Singh, P., Andola HC, HSH Rawat, Pant GJN Purohit y VK, de 2011. Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in an-overview. Infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR) espectroscopia en un resumen. Res. Res. J. Med. J. Med. Plant, 5: 127-135. Planta, 5: 127-135.

## 9. ANEXOS

### ANEXO A. ATAQUE QUIMICO CON AGUA REGIA

Se peso en la balanza de precisión una muestra de 1 gramo de mineral, luego se agrego en un vaso precipitado de 100 ml. A esta muestra se le añadió 5 ml de una mezcla de  $\text{HNO}_3:\text{HCl}$  (3:1) y 5 ml de  $\text{HClO}_4$  concentrado. Se calentó el vaso con la muestra en las placas calefactoras y dentro de la campana extractora durante 1 hora y luego hasta sequedad. Se dejo enfriar, al menos 10 minutos, y se redisolvió el residuo con 5 ml de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada y 5 ml de  $\text{HNO}_3$  concentrado. Luego se paso el extracto por un embudo con un filtro, se recogió el filtrado sobre un matraz de 50 ml. Se lavo el vaso con  $\text{H}_2\text{O}$  destilada y se paso por el filtro, para recogerlo sobre el matraz de 50 ml (se realizo esta operación al menos tres veces). Después se aforo el matraz de 50 ml con  $\text{H}_2\text{O}$  destilada.

## ANEXO B. ENSAYO AL FUEGO

Como primera medida, se realizó el ensayo al fuego del mineral de interés con el fin de confirmar la presencia de oro, y a su vez determinar de manera aproximada la ley del mineral. El valor obtenido en este ensayo fue corroborado con el obtenido mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Procedimiento:

1. Pesar 30 g de mineral y someterlo a tostación por 30 min. Con el propósito de eliminar los sulfuros metálicos presentes en la mena.
2. Pesar el material obtenido y proceder a fundirlo con la siguiente carga fundente:
  - Carbonato de sodio: 40 g
  - Sílice: 2 g
  - Litargirio: 45 g
  - Bórax: 6 g
  - Harina: 4 g

En la fundición se busca reducir los óxidos metálicos a metal elemental.

3. Mezclar el material tostado y los constituyentes de la carga fundente, luego depositarlos en un crisol de arcilla.
4. Cubrir la mezcla contenida en el crisol con una delgada capa de bórax.
5. Colocar el crisol en el horno para su fundición durante 30 min, y colocar una copela en el horno.
6. Verter la fundición en una lingotera previamente calentada.
7. Separar el botón de plomo de la escoria y darle forma cubica con un martillo.
8. Colocar el botón de plomo en la copela que se encuentra en el horno.
9. Abrir ligeramente la puerta del horno para facilitar la entrada del oxígeno y oxidar el botón.
10. Continuar la copelación durante 30 minutos.
11. Retirar la copela del horno y dejarla enfriar.
12. Sacar el doré de la copela, pesar y anotar su valor.

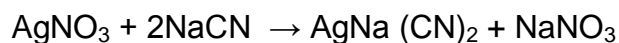
13. Limpiar el doré y darle forma de pastilla, para luego atacarlo con ácido nítrico en relación 1:7 para acelerar la reacción, calentar la solución que contiene el doré.
14. Enjuagar la pastilla de oro con agua destilada, al terminar la reacción.
15. Colocar la pastilla de oro en un crisol de porcelana, luego introducirlo en el horno por uno o dos minutos.
16. Pesar la pastilla de oro y anotar su valor.
17. Hacer los cálculos respectivos para determinar tenores de oro y plata.

## ANEXO C. MÉTODO VOLUMÉTRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE CIANURO LIBRE

Se trata de mantener la concentración de cianuro libre constante durante la lixiviación.

Procedimiento:

Se titularon muestras de 10 ml con una solución de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) 0.1N, en presencia de yoduro de potasio (KI) ó rodamina (rodamina benzilideno p-dimetilamina) como indicador (2 gotas), para formar el complejo de cianuro soluble ( $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ ). En cuanto esté acomplejado todo el  $\text{CN}^-$  y exista un pequeño exceso de plata ( $\text{Ag}^+$ ) añadido, este exceso es detectado por el indicador, sensible a la plata y ocasiona en la solución un viraje amarillo pálido en el caso del yoduro de potasio o un color naranja en el caso de la rodamina. La reacción es:

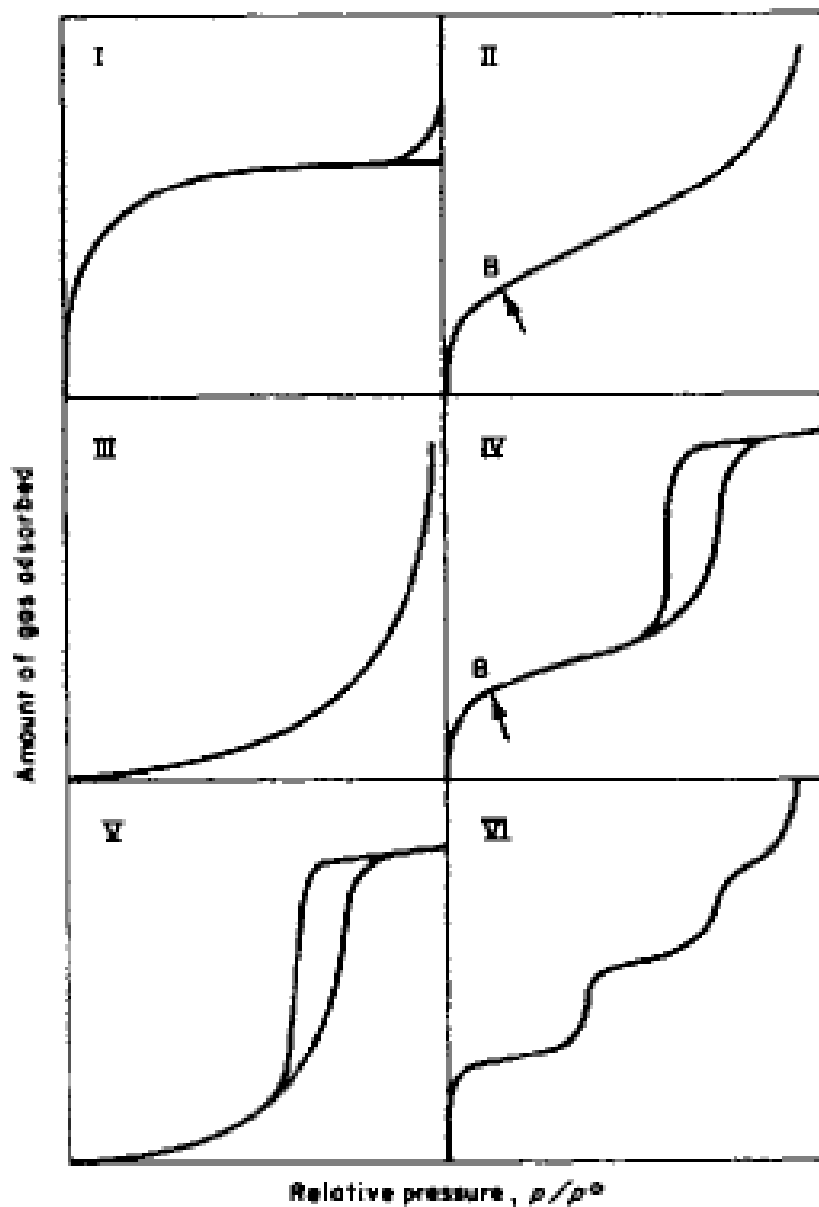


Luego se realizan los cálculos basados en la estequiometría de la ecuación 17, para determinar la concentración de cianuro libre en mg/l.

## ANEXO D. ISOTERMAS DE ADSORCION

Se han propuesto muchas clasificaciones de las isothermas de adsorción, pero la que es aceptada en la actualidad como más adecuada es la propuesta por Brunauer, Deming, Deming y Teller (BDDT).

FIGURA 41. Clasificación BDDT de isothermas de adsorción.



La clasificación de poros que actualmente se admite, como más general, es la sugerida por el IUPAC, que señala tres grupos:

- Microporos, con diámetros inferiores a 2 nm.
- Mesoporos, con diámetros comprendidos entre 2 y 50 nm.
- Macroporos, con diámetros superiores a 50 nm.