



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“DISEÑO DE PROCESO DE TRATAMIENTO PARA MENAS
REFRACTARIAS CON ALTO PORCENTAJE DE PREG-ROBBING”**

PROYECTO DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN MINAS

Presentado por:

PAULO ANDRÉS VALDIVIESO BERMEO

GUAYAQUIL - ECUADOR
2017

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres: Paulo y Lourdes, y a mis hermanos Luis e Isabel, cuyo apoyo y aliento siempre fue esencial durante mis años de estudio.

Paulo Valdivieso Bermeo

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos a la empresa Legemesa S.A y a todo su personal, por haberme permitido desarrollar este proyecto en sus instalaciones y por haber creído en mis capacidades.

Al Dr. Eduardo Recalde, por su guía en la elaboración de este trabajo.

Al Ing. Marco Vega, por su ayuda y guía durante la fase de pruebas del proyecto.

A mis profesores, quienes aportaron en mi formación profesional.

Paulo Valdivieso Bermeo

TRIBUNAL DEL PROYECTO

**Eduardo Luis Recalde Chiliza, PhD.
DIRECTOR DE MATERIA INTEGRADORA**

**Juan Carlos Pindo Macas, Ing.
MIEMBRO EVALUADOR**

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral"

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

Paulo Andrés Valdivieso Bermeo

RESUMEN

El trabajo consiste en el diseño de un proceso de tratamiento para una mena refractaria con alto porcentaje de preg-robbing, el cual reduce la eficiencia de un proceso de lixiviación con cianuro, obteniéndose recuperaciones menores al 10% mediante cianuración directa. Se propuso experimentar con flotación utilizando el reactivo REX® con el objetivo de deprimir la materia causante del preg-robbing y un pretratamiento con un surfactante catiónico para pasivar el material carbonoso durante una lixiviación estándar y una lixiviación con carbón (CIL).

Primero se caracterizó el material causante del preg-robbing por medio de análisis con microscopía de barrido electrónico, difracción de rayos X y láminas delgadas del material. Esta caracterización dio como resultado que el material causante del preg-robbing es un esquisto grafitico o grafitoso, con un contenido de grafito el 17.2 % en el material de cabeza.

Los resultados utilizando REX® fueron muy positivos, disminuyendo el preg-robbing de 50% hasta un 3.69% para dosis de 6.36 kg/ton. La cianuración utilizando surfactante no sirvió para aumentar la recuperación y tuvo un efecto

negativo en todas las pruebas realizadas, tanto para CIL como para las pruebas sin CIL.

El uso de carbón activado en todas las pruebas resultó ser muy positivo en todas las pruebas, ya que se dio un aumento de 25 % con respecto a las recuperaciones sin usar CIL. Se logró aumentar las recuperaciones del 10% inicial a 87% de oro cianurable.

PALABRAS CLAVE: Preg-robbing – REX® – Surfactante – Lixiviación –
Materia carbonosa

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	<i>I</i>
AGRADECIMIENTO.....	<i>II</i>
TRIBUNAL DEL PROYECTO.....	<i>III</i>
DECLARACIÓN EXPRESA	<i>IV</i>
RESUMEN	<i>V</i>
ÍNDICE GENERAL	<i>VII</i>
ABREVIATURAS	<i>XII</i>
SIMBOLOGÍA.....	<i>XIII</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>XIV</i>
ÍNDICE DE TABLAS.....	<i>XVII</i>
CAPÍTULO 1.....	19
INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. Generalidades	20
1.1.1. Antecedentes	20

1.1.2. Justificación.....	22
1.2. Planteamiento del problema	23
1.3. Objetivos.....	24
1.3.1. Objetivo general	24
1.3.2. Objetivos específicos.....	24
1.4. Hipótesis de investigación	24
1.5. Limitaciones de la investigación.....	25
CAPÍTULO 2.....	26
MARCO TEÓRICO.....	26
2.1. Introducción	27
2.2. Mecanismos de absorción y efectos en la lixiviación de la materia carbonosa	31
2.2.1. Tratamientos de menas de oro de material carbonoso	34
2.2.2. Flotación.....	35
2.2.3. Supresión	36
2.2.4. Carbón activado y resina en pulpa	37
2.2.5. Tostación.....	38
2.2.6. Oxidación química.....	39
2.2.7. Polímeros orgánicos en flotación	41

2.3. Metodología experimental.....	43
2.3.1. Estructura de la investigación	43
2.3.2. Preparación y análisis de material	45
2.3.2.1. Reducción de tamaño	45
2.3.2.2. Granulometría de ensayos	47
2.3.3. Caracterización del material	48
2.3.3.1. Laminas delgadas	48
2.3.3.2. Microscopia de barrido electrónico	51
2.3.3.3. Análisis de difracción de rayos X (DRX)	53
2.3.3.4. Pruebas de preg-robbing.....	54
2.3.4. Reactivos e insumos	56
2.3.4.1. Flotación	56
2.3.4.2. Lixiviación	57
2.3.5. Condiciones de experimentación.....	58
2.3.5.1. Pruebas de flotación.....	58
2.3.5.2. Pruebas de lixiviación.....	64
2.3.6. Equipos de análisis, control y preparación de muestras	68
CAPÍTULO 3.....	74

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
3.1. Caracterización del material	75
3.1.1. Identificación de especies minerales y material carbonosa.....	75
3.1.2. Resultados de imágenes SEM de la mena	80
3.2. Análisis de difracción de rayos X (DRX) del material de cabeza	85
3.3. Resultados pruebas de flotación	87
3.3.1. Preg-robbing de concentrados de flotación	91
3.4. Resultados imágenes SEM de concentrados.....	95
3.4.1. Análisis de difracción de rayos X (DRX) del material concentrado	99
3.5. Resultados pruebas de lixiviación	100
3.5.1. Resultados de pruebas de lixiviación de control (cabeza y concentrados sin uso de REX®).....	100
3.5.2. Resultados de ensayos preliminares de concentrados tratados con REX®	102
3.5.3. Resultados ensayos 1 con surfactante	103
3.5.4. Resultados ensayos 2 con surfactante	105
3.5.5. Resultados de ensayos 3 con surfactante	106
3.5.6. Resultados ensayos CIL.....	109
CAPÍTULO 4	119

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
CONCLUSIONES.....	120
RECOMENDACIONES	121

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

CIL	Lixiviación con carbón
DRX	Difracción de rayos X
SEM	Microscopía de barrido electrónico
Ro	Etapa de flotación rougher
SCV	Etapa de flotación scavenger
CLN	Etapa de flotación cleaner
FD	Flotación con REX®
PR %	Porcentaje de preg-robbing

SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
g/ton	Gramos por tonelada
Kg/ton	Kilogramos por tonelada
g/Kg	Gramos por kilogramo
Kg	Kilogramos
Au	Oro
ml	Mililitros
NaCN	Cianuro de sodio
Al	Aluminio
C	Carbono

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Mapa conceptual representando la metodología a seguir.	43
Figura 2.2 Pulverizador planetario marca Fritsch utilizado en la fase de preparación mecánica.	46
Figura 2.3 Pulverizador planetario marca Fritsch utilizado en la fase de preparación mecánica.	47
Figura 2.4 Máquina utilizada para realizar el corte y desbaste de láminas. ...	50
Figura 2.5 Microscopio utilizado para análisis de láminas delgadas.	51
Figura 2.6 Equipo utilizado para análisis de microscopía de barrido electrónico.	52
Figura 2.7 Equipo utilizado para análisis de difracción de rayos X.	54
Figura 2.8 Esquema de proceso de flotación empleado para las pruebas. ...	59
Figura 2.9 Celda de flotación Agitair LA-500 utilizada en las pruebas de flotación.	64
Figura 2.10 Botella de cianuración de 2 L utilizada en las pruebas de los ensayos.	68
Figura 2.11 Equipo de absorción atómica.	69
Figura 2.12 Equipo para realizar medidas potenciométricas de pH.	70
Figura 2.13 Horno de secado de muestras.	70

Figura 2.14 Agitador orbital para pruebas preg-robbing.	71
Figura 2.15 Balanza analítica para pesado.	72
Figura 2.16 Equipo para determinar la granulometría.	72
Figura 2.17 Equipo de filtrado a presión de muestras.	73
Figura 3.1 Muestra de mano de la zona de estudio del proyecto.	76
Figura 3.2 Lamina delgada de material carbonoso, en el punto 1 se observa estratos de arcillas y en el punto 2 estratos de materia carbonosa.	77
Figura 3.3 Ampliación de la imagen anterior, donde se observa las vetillas de cuarzo en la matriz de roca meta sedimentaria.	77
Figura 3.4 Se observa sulfuros (Py) incrustados en las vetillas del material carbonoso.	79
Figura 3.5 En la imagen de la derecha se observa moscovita (1), mientras que en la de la izquierda se pueden observar minerales de sillimanita (2).	80
Figura 3.6 Análisis puntual de materia carbonosa asociada a la mena.	81
Figura 3.7 Análisis puntual de materia carbonosa asociada a la mena.	83
Figura 3.8 Análisis puntual de materia carbonosa asociada a la mena, observar partículas 1 y 2 con estructura de hojas en la imagen.	84
Figura 3.9 Gráfica comparativa de la recuperación y la ley de los concentrados de flotación.	88
Figura 3.10 Ratios de concentración en comparación con las dosis de REX®.	89
Figura 3.11 Preg-robbing en comparación con las dosis de REX®.	94

Figura 3.12 Imagen de concentrado obtenido por microscopia de barrido electrónico.	96
Figura 3.13 Imagen de conglomerado de pirita y materia carbonosa en concentrado obtenido por microscopia de barrido electrónico.	98
Figura 3.14 Resultados de ensayos con surfactante.	108
Figura 3.15 Comparación recuperaciones lixiviaciones con CIL (arriba) y sin CIL (abajo) a distintas concentraciones para material sin tratamiento previo y para concentrado de flotación sin REX®.	111
Figura 3.16: Comparación recuperaciones lixiviaciones con CIL y sin CIL a distintas concentraciones de surfactante para ensayo 1 y 2.	114
Figura 3.17 Comparación recuperaciones lixiviaciones con CIL y sin CIL a distintas concentraciones de surfactante para ensayo 3.	115
Figura 3.18 Absorción del carbón activado para cada prueba del ensayo 1.	117
Figura 3.19 Absorción del carbón activado para cada prueba del ensayo 2.	118
Figura 3.20 Absorción del carbón activado para cada prueba del ensayo 3.	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Clasificación de los polímeros orgánicos	42
Tabla II. Granulometría utilizada en ensayos flotación.	47
Tabla III. Granulometría utilizada en ensayos de lixiviación.....	48
Tabla IV. Reactivos colectores utilizados en la flotación.....	56
Tabla V. Reactivos colectores utilizados en la flotación.....	57
Tabla VI. Dosificaciones de reactivos utilizadas en pruebas de flotación, Ro (Rougher), SCV (Scavenger).....	61
Tabla VII. Dosificación de reactivos utilizadas en pruebas sin REX®.	63
Tabla VIII. Parámetros utilizados en las pruebas de cianuración en concentrados preliminares.....	65
Tabla IX. Parámetros utilizados en las pruebas de cianuración con surfactante en todos los ensayos.....	66
Tabla X. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.6.....	82
Tabla XI. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.7.....	83
Tabla XII. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.8 en el punto 1.	84

Tabla XIII. Resultados obtenidos del análisis de DRX en la muestra.....	86
Tabla XIV. Resultados de pruebas de flotación.	87
Tabla XV. Resultados de ensayos preg-robbing.....	91
Tabla XVI. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.12	97
Tabla XVII. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.13.	97
Tabla XVIII. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.13	99
Tabla XIX. Resultados obtenidos del análisis de DRX en la muestra.	100
Tabla XX. Resultados de recuperaciones ensayos preliminares.	101
Tabla XXI. Resultados de recuperaciones ensayos preliminares.	103
Tabla XXII. Resultados de recuperaciones finales para ensayo 1	104
Tabla XXIII. Resultados de recuperaciones finales para ensayo 2	106
Tabla XXIV. Resultados de recuperaciones finales para ensayo 3.....	106
Tabla XXV. Resultados de lixiviaciones CIL para material sin tratamiento y concentrado sin REX®.	109
Tabla XXVI. Resultados de lixiviaciones CIL para ensayo 1.....	112
Tabla XXVII. Resultados de lixiviaciones CIL para ensayo 2.....	113
Tabla XXVIII. Resultados de lixiviaciones CIL para ensayo 3.....	113

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

1.1.1. Antecedentes

La mineralogía de los yacimientos auríferos explotados en un sector minero “El Vapor”, ubicado al norte de Colombia, en el departamento de Antioquia, contiene una cantidad considerable de sulfuros con oro refractario, diseminados en una matriz de material carbonoso. El yacimiento forma parte del prolífico cinturón de oro de Segovia ubicado en la parte sur de este.

La cartografía geológica revela sugiere una serie de vetas auríferas anastomosantes compuestas principalmente de cuarzo y pirita dentro de una serie más amplia de zona de un cizallamiento mineralizado.

La matriz carbonosa genera problemas al momento de realizar la cianuración, se produce bajas recuperaciones debido a que los complejos ciano-auríferos formados a partir de la lixiviación, son absorbidos y atrapados por el material carbonoso que compite con el carbón activado en la solución. A este fenómeno se lo conoce como preg-robbing, y por lo general estos materiales carbonosos consisten en carbones elementales activos y componentes orgánicos formados por hidrocarburos de cadena larga y ácidos

orgánicos similares al ácido húmico (Afenya, 1991), aunque también en este grupo se incluyen materiales arcillas, las cuales tienen la capacidad de absorber complejos de oro con cianuro mediante mecanismos físico-químicos, ya sea por absorción o por reducción de los complejos de oro en la superficie de las arcillas (Tremolada, Dzioba, Bernardo-sánchez, & Menéndez-aguado, 2010).

El material carbonoso de la mena que se va investigar se trata posiblemente de una roca sedimentaria o metamórfica con alto contenido geológica de carbón. A pesar de que existen alternativas de tratamiento para reducir la absorción del material carbonoso por aumento de tamaño de partículas de complejos auríferos (cloración, tiourea), la empresa requiere que se realice un pre-tratamiento con el objetivo de adecuar el material para un proceso posterior de cianuración, debido a que tienen toda la infraestructura diseñada para este tipo de tratamiento metalúrgico.

En la actualidad existen dos alternativas generalmente utilizadas para el tratamiento de menas refractarias carbonosas en las menas: realizar la pasivación del material carbonoso parcial o completamente. Otros métodos utilizados para tratar menas

carbonosas son la tostación a altas temperaturas, bio-oxidación, oxidación química, adsorción competitiva, barrera de inhibición y tostación con microondas (Yang, Liu, Song, & Dong, 2013).

1.1.2. Justificación

Las bajas recuperaciones obtenidas al realizar cianuración de menas refractarias asociadas a material carbonoso por causa de preg-robbing en una mina ubicada en Colombia en el departamento de Antioquia supone una oportunidad para desarrollar investigaciones en el tema de pre-tratamientos de menas de este tipo, que ocasionan un tipo de refractariedad que no ha sido estudiada ampliamente.

La industria minera siempre está buscando nuevas alternativas y técnicas que permitan extraer yacimientos con menas refractarias. Es una tendencia a nivel mundial el desarrollo de investigaciones de este tipo, especialmente en el área de hidrometalurgia, por lo que es necesario que el país se dé importancia a la investigación y desarrollo de técnicas en este campo para aportar a la industria minera del país.

Logrando diseñar un proceso de pre-tratamiento enfocado en solucionar el problema del preg-robbing aumentando así la recuperación en un proceso posterior de cianuración, se estaría beneficiando de manera directa a la economía de la mina con el problema y desde el punto de vista académico e investigativo se abrirían nuevos horizontes de investigación a partir de este trabajo acerca de nuevas alternativas de pre-tratamientos de menas refractarias causadas por material carbonoso asociado, tema del cual se encuentra poca bibliografía disponible.

1.2. Planteamiento del problema

Los minerales de sulfuro asociados con oro se encuentran diseminados por una matriz con alto contenido de carbón que dificulta su recuperación mediante una cianuración por el fenómeno de preg-robbing, que consiste en el atrapamiento de complejos de cianuro y oro en el material carbonoso. Se tiene que diseñar y aplicar un pre-tratamiento pensando en que luego se pasará a una etapa de cianuración, y que los métodos utilizados para separar, pasivar o deprimir el carbón, no deben interferir con la superficie de los sulfuros de manera que puedan reducir su lixiviabilidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Diseñar un proceso de tratamiento hidrometalúrgico que permita disminuir el porcentaje de preg-robbing y mejorar la recuperación de oro de una mena asociada a material carbonoso.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar una correcta caracterización de las especies minerales en la mena e identificar el material carbonoso asociado.
- Analizar mediante un microscopio de barrido electrónico la superficie de absorción del material carbonoso y como se encuentra asociado después de realizar una flotación como pretratamiento.
- Determinar cuáles son las concentraciones óptimas de los reactivos a utilizar para disminuir satisfactoriamente el preg-robbing.

1.4. Hipótesis de investigación

- Realizar una flotación selectiva utilizando REX® como depresor del material carbonoso para disminuir el preg-robbing posterior a un proceso de cianuración.
- Realizar un pretratamiento supresivo o pasivante con un reactivo surfactante catiónico del material en pulpa antes de cianuración, para lograr pasivar la materia carbonosa disminuyendo el fenómeno de preg-robbing en el proceso posterior.

- Utilizar carbón en la lixiviación (CIL) para competir con el material causante del preg-robbing y lograr una recuperación mayor.

1.5. Limitaciones de la investigación

Una limitante para realizar la investigación es la falta de equipos y recursos dentro de la facultad para realizar las pruebas pertinentes. Se depende de terceros para poder realizar pruebas de cianuración y ensayos al fuego que permita determinar el contenido de oro total y cianurable en cada muestra a la cual se le aplique el pre-tratamiento con distintas condiciones. También la falta de equipos para realizar una caracterización precisa del material que es fundamental para el desarrollo de la investigación, ya que en la facultad no cuenta con equipos para realizar imágenes con telescopio de barrido electrónico ni difracción de rayos X.

La falta de información bibliográfica precisa acerca de procesos o pre-tratamientos realizados con un material de las mismas condiciones en el sector no nos permite tener un punto de referencia con el cual se pueda analizar y contrastar los resultados que se puedan obtener en el transcurso de esta investigación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

Las menas o minerales de oro se definen como refractarios cuando la recuperación por medio de una cianuración directa del material finamente molido es inferior al 80% (Nieves Iglesias, 1994). Estas bajas recuperaciones generalmente no permiten que la actividad extractiva sea económicamente rentable. Las arenas refractarias pueden provenir de un proceso de concentración por flotación o de colas de relaves tras un proceso de cianuración.

La causa más común de la refractariedad es el atrapamiento, oclusión o diseminación de partículas submicroscópicas de oro ($< 1 \mu\text{m}$) dentro de minerales sulfuros como la pirita, arsenopirita, y el cuarzo, las cuales son matrices insolubles que impiden que el cianuro pueda reaccionar con el oro encapsulado (Parga & Carillo, 1996). Otras causas importantes de la refractariedad son también los minerales carbonosos.

Los materiales carbonosos asociados a menas de oro son generalmente carbones elementales activos y componentes orgánicos formados por hidrocarburos de cadena larga y ácidos orgánicos similares a los ácidos húmicos (Afenya, 1991).

También dentro de estos materiales considerados carbonosos se pueden encontrar rocas sedimentarias o metamórficas con alto contenido de material carbonoso como esquistos carbonosos, pizarras negras o carbonosos y lutitas bituminosas, por lo que se puede decir que el término se lo utiliza para referirse a varios materiales (Afenya, 1991).

En general, se han realizado pocos avances en lo que concierne a los efectos que tiene en la cianuración las menas asociadas con material carbonoso, la mayoría de los estudios realizados están enfocados en determinar la composición y propiedades de los materiales carbonosos. Se han realizado estudios (Tan, Feng, Lukey, & Van Deventer, 2005), indicando que estos materiales no solo estarían afectando la recuperación de oro por el fenómeno de preg-robbing, sino que también afectaría a la disolución del oro por recubrimientos carbonosos a las partículas.

Otro material el cual se conoce que posee la capacidad de generar el fenómeno de preg-robbing son las arcillas (aluminosilicatos). Se ha observado que en soluciones con iones de Au disueltos y con la presencia de arcillas existe absorción de dichos iones en la superficie de las arcillas. Según Tremolada (Tremolada, Dzioba, Bernardo-

sánchez, & Menéndez-aguado, 2010), esta absorción se produce ya sea por absorción física en la superficie de las arcillas o por reducción de los complejos de oro y cianuro en la superficie del mineral.

En si se puede decir que las arcillas tienen cargas negativas fuertes en su superficie, lo que le permite absorber cationes en las soluciones cianuradas.

Es importante antes de cualquier estudio determinar del grado de preg-robbing que puede tener una mena de oro asociada a material carbonoso, para tener claro de qué tipo de material carbonoso se trata. Se han propuesto varias fórmulas para determinar el grado de preg-robbing de una mena, una de ellas calcula el efecto de preg-robbing del carbón (PR) con la siguiente expresión (Goodall, Leatham, & Scales, 2005):

$$PR\% = \frac{(C_{iAu} + C_{lLix}) - C_{fAu}}{C_{iAu}}$$

Este método de ensayo es el más simple y usado, y fue desarrollado por Barrick Gold Mines Incorporated (BGMI). Este es utilizado por esta empresa para estimación de preg-robbing en planta, donde se requieren resultados rápidos para tomar decisiones acerca de cómo ajustar parámetros de tratamiento del mineral.

Otro ensayo utilizado para determinar el grado de preg-robbing de una muestra es el PRI o índice de preg-robbing por sus siglas en ingles (Dunne, et al., 2012). Este ensayo consiste en determinar el oro cianurable en solución en botella y luego compararlo con una solución con cianurada con una determinada concentración de oro.

Se toman dos muestras secas, una de 20 gramos la cual es cianurada en botella con 20 ml una solución cáustica de cianuro (0.1% NaOH, 0.3% NaCN) para medir “sensibilidad a cianuro” durante una hora. Otra muestra de 10 gramos se la lixivia en botella con 20 ml de una solución cargada con oro (0.1% NaOH, 0.3% NaCN y 1.7 ppm Au). Luego se filtran las soluciones y se procede a medir las concentraciones de oro para obtener el PRI con la siguiente formula:

$$PRI = 3.4 + 2 \times ([Au]_{\text{solución con cianuro}} - [Au]_{\text{solución con cianuro y oro}})$$

Este ensayo solo mide la absorción de preg-robbing por oro solo hasta un máximo de 3-4 gr de oro por tonelada, y se usa generalmente para diferenciar y clasificar el grado de preg-robbing en una muestra, pero no determina cual es el porcentaje de preg-robbing.

2.2. Mecanismos de absorción y efectos en la lixiviación de la materia carbonosa

Se han realizado varios estudios con respecto a cómo actúan los materiales carbonosos en contacto con soluciones de cianuro cargadas de oro. Uno de los factores más mencionado en la literatura, es la presencia de ácidos húmicos que actúa como quelantes del oro.

Los ácidos húmicos presentes en la mayoría de los materiales carbonosos son compuestos orgánicos pobremente bio-degradables de origen bacteriano, vegetal o animal. Estos contienen grupos de carboxilos ácidos, hidroxilos fenólico y de alcohol, grupos de cetonas y quinonas, con estructura de hidrocarburos aromáticos, que pueden quelar al oro y volverse estables en condiciones oxidantes (Pyke, Johnston, & Brooks, 1999).

Otros autores han descrito que aparte de la absorción química producida por los agentes quelantes que se encuentran en los carbones, se tienen la acción de moléculas neutrales que atrapan los complejos ciano-auríferos en la solución y también la interacción electroestática en la superficie del carbón (Afenya, 1991).

Para entender mejor los mecanismos de absorción, se ha comparado con las características del carbón activado. Se ha observado que el carbón activado posee un comportamiento variado según el lugar en su superficie (Guay, 1981). Lugares hidrofóbicos confinados a los planos basales, los cuales pueden estar fracturados y por los cuales ingresan grupos funcionales que atrapan los complejos ciano-auríferos y lugares hidrófilos en los bordes de los planos basales.

Se espera que la absorción dependa del lugar de contacto de la molécula ciano-aurífera con la superficie del carbón. Se esperaría que la asociación sea en los lugares con características hidrofóbicas en la superficie del carbón, siempre y cuando la molécula del complejo de oro posea una carga neutra (Afenya, 1991).

Algunos de los grupos funcionales que están en la superficie del carbón incluyen ácido carboxílico, fenólico, lactona, quinonas, hidroperóxido y cromenol. Estos grupos proporcionan las propiedades de intercambio iónico o redox para el carbón. Los complejos ciano-auríferos se cree que es adsorbido vía intercambio iónico con OH^- en sitios con cromenol, mientras que el CN^- se degrada por los sitios de peróxido.

En el caso de las arcillas, la absorción se da por las fuertes cargas negativas existentes en su superficie que genera un fuerte intercambio iónico entre los complejos de la solución y la superficie de las arcillas (Gillot, 1968). En estudios realizados en 1999 (Hong & Ye, 1998), por medio de microscopia de transmisión de electrones, se pudo observar que dos componentes importantes en las arcillas como son la caolinita y la illita absorben el Au en sus bordes.

La caolinita posee carga heterogénea y en las superficies basales posee carga negativa, atribuida al reemplazamiento de iones de Si^{4+} por iones de Al^{3+} . En cambio las cargas en sus bordes dependen de la protonación y desprotonación de los grupos hidroxilos que a su vez dependen del pH (Zhou & Gunter, 1992).

En un estudio realizado por Tremolada (Tremolada, Dzioba, Bernardo-sánchez, & Menéndez-aguado, 2010) se concluyó que la montmorillonita caracterizada por la presencia de silicatos y complejos de aluminio y sílice, tiene una capacidad de absorción grande de solución de complejos de cianuro y Au. También Tremolada verificó que las arcillas poseen una alta capacidad de intercambio iónico con la solución lixiviada y que estos se asimilan en sus matrices (Tremolada, Dzioba, Bernardo-sánchez, & Menéndez-aguado, 2010).

Con respecto al comportamiento del material carbonoso en la disolución del oro, algunos estudios mencionan que en la fase de molienda se genera recubrimientos de carbón en las partículas de oro y en las partículas de sulfuro que afectan de manera negativa a lixiviación y aumenta el preg-robbing de estos (Tan, Feng, Lukey, & Van Deventer, 2005). Se observado que la materia carbonosa prefiere recubrir superficies de sulfuros de hierro hidrofóbicos.

El material carbonoso que no recubre al oro totalmente, por lo que no impide lixiviación de este elemento, pero si afecta a la cinética de la disolución, observándose que los efectos de este recubrimiento disminuyen después de 48 horas de lixiviación (Tan, Feng, Lukey, & Van Deventer, 2005).

2.2.1. Tratamientos de menas de oro de material carbonoso

Cada mena asociada a materiales carbonosos tiene un problema particular que debe ser resuelto. Los métodos de tratamiento más utilizados para este tipo de material son: flotación, supresión de materia carbonosa con algún reactivo, uso de un material altamente competitivo que pueda adsorber las partículas oro

disuelto más rápido que la materia carbonosa, tostación, oxidación química y lixiviación bacteriana (Afenya, 1991).

2.2.2. Flotación

Aplicable cuando pequeñas cantidades de oro están asociadas a la materia carbonosa o cuando el oro no exhibe una flotabilidad natural y se puede remover la parte carbonosa fácilmente. Se han utilizado varios agentes para deprimir la materia carbonosa que es naturalmente hidrófoba, entre estos están los polímeros orgánicos como el almidón.

En los campos de oro de Prestea y Ashanti en Ghana, la materia carbonosa fue deprimida con Aero 633 y almidón, mientras se flotaban los minerales de sulfuro y oro libre. Las recuperaciones de flotación alcanzadas variaron entre 85% y 90% (Afenya, 1991).

Las mezclas de polímeros orgánicos también han sido utilizadas con el fin de deprimir la materia carbonosa como el agente G4 producido por Bayer fue utilizado por muchos años por la mina

Mount Isa Hilton, este agente tiene 55% de REX® (Bulatovic, 2007).

2.2.3. Supresión

Ciertos agentes orgánicos que pueden ser absorbidos selectivamente por carbón activado y suavizan su superficie han sido utilizados para suprimir la materia carbonosa en las menas de oro antes de la cianuración. Reactivos como el queroseno, el fuel oil, entre otros han sido utilizados. Este método, sin embargo, no es usado cuando considerables cantidades de oro refractario está asociado a la materia carbonosa.

Otros de los materiales utilizados para suprimir la materia carbonosa son reactivos tensioactivos o surfactantes, con los cuales se han realizado estudios utilizando reactivos iónicos y no iónicos. Los surfactantes son compuestos que a bajas concentraciones tiene la capacidad de penetrar en la superficie o interface de sistemas alterando de cierta manera la energía libre de aquellas superficies.

La energía libre entre estas superficies se refiere al trabajo requerido para crear estas interfaces. Por lo tanto, los surfactantes son sustancias que disminuyen el trabajo requerido para expandir o crear estas interfaces entre superficies.

Se han realizado pruebas utilizando surfactantes aniónicos de alquilsulfonatos, sulfonatos etoxilados y surfactantes no iónicos de alcoholes etoxilados o alquilfenoles y se ha encontrado que son efectivas de supresión de materiales carbonosos.

Sin embargo es recomendable utilizar surfactantes catiónicos, ya que los surfactantes aniónicos poseen propiedades altamente espumantes que puede ser contraproducente para procesos posteriores de lixiviación (Zhou, et al., 2015).

2.2.4. Carbón activado y resina en pulpa

El principio de este método consiste en usar un absorbente más fuerte que la materia carbonosa presente en la mena. Si este método es utilizado en menas con bajo contenido de material carbonoso, puede ser exitoso.

Mediante el uso de carbón activado como el adsorbente en un mineral ligeramente refractario en la mina de Carlin-Nevada, alrededor del 70% del oro se pudo recuperar, en comparación con el 15% sin utilizar carbón activado (Afenya, 1991). Este método es muy atractivo debido a sus bajos costos operativos.

El uso de resinas sintéticas de intercambio iónico en pulpa ha sido ampliamente utilizado en Muruntau (Uzbekistán) durante muchos años, también se han aplicado en Golden Jubilee (Sudáfrica) y Penjom (Malasia) (Zhou, et al., 2015).

La principal ventaja de utilizar resinas son las mejores cinéticas de absorción y capacidad de carga mayor que la del carbón activado. También se ha observado que las resinas son afectadas en menor grado por las partículas inorgánicas como arcillas y reactivos orgánicos presentes en el sistema (Zhou, et al., 2015).

2.2.5. Tostación

Este es el método más fácil y efectivo para destruir la materia carbonosa en la mena y oxidar los sulfuros presentes. Las temperaturas más utilizadas para este tipo de procesos varían

entre 600 y 700 °C. A pesar de dar buenos resultados, se están buscando alternativas a este proceso debido a la contaminación ambiental que produce, el costo elevado de energía y regulaciones ambientales en países.

2.2.6. Oxidación química

Se ha invertido mucho en estos tipos de tratamientos con el objetivo de reemplazar a la tostación. Los tipos de tratamientos de oxidación más conocidos son: oxidación hidrometalúrgica, lixiviación en autoclave a presión y bio-lixiviación u oxidación bacteriana.

La oxidación hidrometalúrgica engloba técnicas como la oxidación con cloro, que consiste en utilizar gas de cloro como agente oxidante, aunque también hipoclorito generado por electrolisis in situ. Generalmente cuando se tiene menas muy refractarias se utiliza doble oxidación, una etapa se realiza una oxidación inyectando aire a la pulpa a una temperatura entre 60 y 80 °C a presiones de 6-8 PSI, a esto le sigue una oxidación con cloro.

La lixiviación en autoclave se la realiza inyectado aire a temperaturas y presiones elevadas similar a la primera etapa de la oxidación doble mencionada posteriormente.

La lixiviación en autoclave de minerales refractarios de oro a escala industrial comenzó en los años 80, debido al alto precio del oro y porque la oxidación de la presión es una alternativa aceptada al tostado. Este método proporciona recuperaciones elevadas del orden de 90-95% en menas altamente refractarias. La desventaja de este método consiste generalmente en la generación no deseada de precipitados debido a la mineralogía de las menas.

Por último, se tiene la bio-oxidación, que consiste en utilizar bacterias con el fin de oxidar la materia orgánica carbonosa presente en las menas. La desventaja de este método es que las velocidades de reacción son lentas y puede tomar horas o días para tratar la mena (Afenya, 1991).

Otros estudios han utilizados métodos biológicos para tratar las menas, uno de estos son el uso de hongos que descomponen el material carbonoso. El uso del hongo *Phanerochaete*

chrysosporium resultó ser muy efectivo en el tratamiento de material carbonoso, reduciendo el PEC (efecto del preg-robbing en el carbón) en materiales altamente carbonizados como la antracita de 4.5 $\mu\text{mol/g}$ a 0.4 $\mu\text{mol/g}$ (Ofori-Sarpong, Tien, & Osseo-Asare, 2010).

2.2.7. Polímeros orgánicos en flotación

Los polímeros son macromoléculas generalmente orgánicas, las cuales están conformadas por enlaces de tipo covalente de unidades simples llamadas monómeros. Los polímeros orgánicos se dividen en cuatro grandes grupos: no iónicos, iónicos, catiónicos y anfóteros, en la Tabla 1.2 se puede observar la clasificación detallada de estos compuestos.

Sin embargo, los polímeros pueden adquirir distintos comportamientos iónicos y catiónicos, y junto a otras sustancias pueden volverse anfóteros. Los polímeros son utilizados en flotación como modificadores generalmente cumpliendo el papel de depresores, floculantes o dispersores.

Tabla I. Clasificación de los polímeros orgánicos

Grupo	Polímero	Grupo polar activo
No iónico	Almidón	-OH =CO
	REX®	
	Goma arábica	
	Derivados de tanina	
	Oxigelulosa	
Catiónicos	Alcohol de polivinilo	-NH ₂ =NH
	Aminas de polivinilo	
	Poliamina sustituida	
	Ditiocarbamato	
	Aminoácidos	
Iónicos	Carboximetilcelulosa	-COOH -SO ₃ H - OSO ₃ H
	Ácidos alginicos	
	Gomas de celulosa	
	Gomas de guar	
	Poliacrilatos	
Anfóteros	Sulfonatos de lignina modificados	Aniónicos y catiónicos
	Goma animal	
	Quebracho tratado con aminas	

Fuente: Bulatovic, S., 2007.

La REX® son polisacáridos solubles en agua. Su solubilidad depende de parámetros como la temperatura, tiempo de retención y la acidez de la solución. No se sabe bien cuáles son los mecanismos de absorción de la REX® en los minerales, y esto se da a que no existen estudios concluyentes acerca de cómo actúan estos polímeros ya que su comportamiento cambia según diferentes factores y parámetros.

2.3. Metodología experimental

2.3.1. Estructura de la investigación

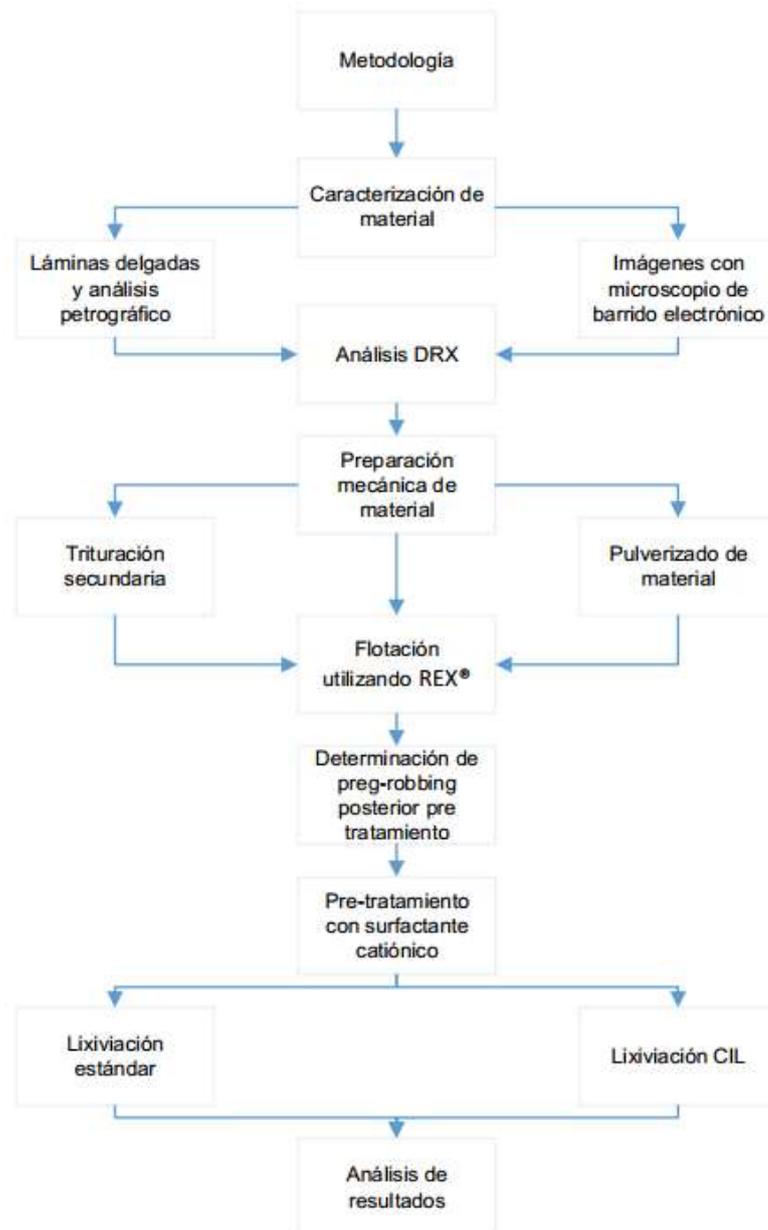


Figura 2.1 Mapa conceptual representando la metodología a seguir.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

La metodología consta de tres fases, la primera en la cual se realiza la caracterización del material carbonoso y los minerales presentes en la mena. La caracterización se hará realizando láminas delgadas de muestras, análisis DRX (difracción de rayos X) e imágenes por microscopía de barrido electrónico

Posteriormente se prepara el material para las pruebas de flotación, realizando un cuarteo y pulverizado del material para separar muestras de 2 Kg para las pruebas flotación utilizando como reactivo depresor REX®.

Reducido el contenido de carbón por medio de flotación, se determinó el porcentaje de preg-robbing (PR% (Goodall, Leatham, & Scales, 2005)) en los concentrados de flotación. Una vez determinado el preg-robbing, se realizará pruebas de lixiviación con los concentrados con menor porcentaje de preg-robbing, realizando previamente un pre-tratamiento con un surfactante catiónico con el objetivo de pasivar y suprimir la materia carbonosa remanente.

El surfactante utilizado es el cloruro de benzalconio al 80%, el cual es un surfactante catiónico viscoso de coloración amarillo

que es comúnmente utilizado como un bactericida e inhibidor de la actividad viral.

Las pruebas se las realizó a distintas concentraciones de surfactante para lograr observar con cual se obtienen mejores resultados y con las mismas condiciones de lixiviación durante 24 horas y se replicaron los ensayos agregando carbón activado en lixiviación.

2.3.2. Preparación y análisis de material

2.3.2.1. Reducción de tamaño

La preparación de muestras se las realizó utilizando una trituradora de rodillos para la trituración secundaria del material, ya que a este material ya se le había realizado una trituración primaria en la planta del proyecto en Colombia.

La etapa de pulverizado se la realizó utilizando una pulverizadora de anillos concéntricos, la cual consta

de regulación de tiempo y trabaja a una amplitud de vibración.

Adicional también se trató el material con pulverizador planetario modelo pulverisette 5 marca Fritsch, el cual consta con cuatro estaciones de trabajo con una capacidad máxima de 900 ml de material. Los equipos utilizados se pueden observar en las siguientes imágenes.



Figura 2.2 Pulverizador planetario marca Fritsch utilizado en la fase de preparación mecánica.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.



Figura 2.3 Pulverizador planetario marca Fritsch utilizado en la fase de preparación mecánica.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

2.3.2.2. Granulometría de ensayos

Las granulometrías utilizadas en los ensayos de flotación y cianuración fueron las siguientes:

Tabla II. Granulometría utilizada en ensayos flotación.

Prueba	FP-1	FP-2	FD-1	FD-2	FD-3	FD-4	FD-5
D80 (µm)	250	200	230	250	230	230	230

Prueba	FD-6	FD-7	FD-8	FD-9	FD-10	FD-11	FD-12
D80 (µm)	200	200	200	250	250	230	230

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Tabla III. Granulometría utilizada en ensayos de lixiviación.

Ensayo cianuración	1	2	3	4
% pasante malla 200 (75 μm)	77	60	82	77

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Para las pruebas de determinación de preg-robbing, se utilizó una granulometría de D80 75 μ m para todos los ensayos, esto según la metodología del ensayo propuesto por la mina Barrick Gold Mines.

2.3.3. Caracterización del material

2.3.3.1. Láminas delgadas

Para realizar la caracterización del material se realizaron láminas delgadas utilizando una máquina cortadora de rocas Metkon modelo Geoform y se utilizó resina epoxi para pegar el material. Los pasos seguidos para la realización de las láminas delgadas fue la siguiente:

- Limpiar el material que se vaya a utilizar para realizar las láminas.
- Seleccionar las muestras que se van a utilizar en el ensayo.
- Limpiar y pulir los portaobjetos.
- Con una cortadora de disco se cortan las rocas hasta formar prismas
- Se pule una de las superficies del material.
- Se adhiere con resina epoxi la cara pulida del prisma a otro portaobjetos, ejerciendo presión para evitar la formación de burbujas y se deja secar.
- Una vez secado, se realiza un desbastado hasta obtener el grosor deseado, normalmente 30 μm .



Figura 2.4 Máquina utilizada para realizar el corte y desbaste de láminas.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Las láminas fueron analizadas en un microscopio de polarización Leica DM2500P el cual se pueden observar las láminas en nicoles cruzados y nicoles paralelos. El equipo se puede observar en la siguiente imagen.



Figura 2.5: Microscopio utilizado para análisis de láminas delgadas.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

2.3.3.2. Microscopia de barrido electrónico

Las imágenes de barrido electrónico fueron realizadas con un equipo FEI Inspect S50, el cual combina todas las imágenes de datos, superficies y composiciones con análisis elemental, también se puede analizar las propiedades del material y la composición del elemento.

Las muestras deben cumplir dos requisitos: deben estar secas y deben ser conductoras. La muestra tuvo una granulometría de 80% pasante malla 200.

La muestra se colocó en una montura de aluminio en forma de botón, la cual tenía adhesivo de carbono para pegar la muestra a la montura. Una vez que la muestra ha sido sujeta a la montura, se colocó dentro de la cámara de análisis al vacío del equipo y se prosiguió a realizar el análisis.



Figura 2.6 Equipo utilizado para análisis de microscopía de barrido electrónico.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

2.3.3.3. Análisis de difracción de rayos X (DRX)

El análisis de difracción de rayos X se lo realizó con el equipo PANalytical XPert Pro, la muestra fue previamente pulverizada y compactada en la bases para ser analizada en el equipo.

Se realizó el análisis cualitativo de 0.5 gramos de muestra para determinar las especies minerales que se encuentran en el material de cabeza y en el concentrado obtenido de las flotaciones realizadas. Para el análisis cuantitativo se tomaron 0.5 gramos que se mezclaron con un patrón de referencia. El patrón de referencia escogido no debe coincidir con los picos de anomalías en el difractograma de la muestra.

Para el análisis se utilizó óxido de cromo como patrón de referencia y se utilizó un modelo polinómico para ajustar el difractograma y hacer la interpolación. El equipo utilizado se puede observar en la siguiente imagen.



Figura 2.7 Equipo utilizado para análisis de difracción de rayos X.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

2.3.3.4. Pruebas de preg-robbing

El ensayo consiste en dejar un 10 ml de solución con una concentración conocida de oro en contacto con 5 g de la mena a analizar por 15 min para luego medir la concentración final de la solución. El ensayo toma en cuenta cuanto oro se lixivia en este tiempo, es por eso que también se debe poner 10

ml de solución de cianuro sin oro para observar la disolución en los 15 min propuestos en el ensayo.

Se calcula el efecto de preg-robbing del carbón (PR) con la siguiente expresión (Goodall, Leatham, & Scales, 2005):

$$PR\% = \frac{(C_{iAu} + C_{Lix}) - C_{fAu}}{C_{iAu}}$$

Donde C_{iAu} y C_{fAu} son las concentraciones inicial y final respectivamente de una solución estándar de oro y C_{Lix} es la disolución de oro que se produce al poner una solución de cianuro con la mena. La metodología del ensayo fue desarrollada por Barrick Gold Mines Incorporated (BGMI) para determinar el porcentaje de preg-robbing en sus proyectos mineros en Carlin, Nevada.

2.3.4. Reactivos e insumos

2.3.4.1. Flotación

Los reactivos utilizados para las pruebas de flotación se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla IV. Reactivos colectores utilizados en la flotación.

Reactivo	Tipo
Xantato amílico de potasio Z6	Colector muy selectivo con los sulfuros, especialmente con la pirita, es usado también en circuitos de flotación con una acidez moderada.
Ditiofosfato AR-1404	Colector selectivo para sulfuros de hierro y cobre, actúa como espumante también.
Ditiofosfato AR-1208	Colector utilizado para recuperar sulfuros de cobre.
Metil isobutil Carbinol MIBC	Espumante altamente selectivo y de rápida cinética, se emplea generalmente donde se requiere una mejor selectividad a la pirita.
REX®	Polímero orgánico soluble en agua.
Cal apagada (Ca(OH)₂)	Compuesto utilizado para regular el pH en las pruebas de flotación.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Los reactivos fueron escogidos en base a la recomendación de la empresa en tratamientos de flotación, utilizando varias dosis en las pruebas las

cuales están especificadas en el apartado de condiciones de experimentación.

2.3.4.2. Lixiviación

Los reactivos utilizados para los ensayos de cianuración se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla V. Reactivos colectores utilizados en la flotación.

Reactivo	Tipo
Cianuro de sodio (NaCN)	Agente lixivante, pureza del 85 %.
Cal apagada (Ca(OH)₂)	Compuesto utilizado para regular el pH del proceso de lixiviación.
Rodamina (C₂₈H₃₁ClN₂O₃)	Indicador utilizado en la titulación para determinar CN- libre.
Cloruro de benzalconio 80%	Surfactante catiónico viscoso e coloración amarillo que es comúnmente utilizado como un bactericida e inhibidor de la actividad viral.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

2.3.5. Condiciones de experimentación

2.3.5.1. Pruebas de flotación

Se realizaron varias pruebas de flotación utilizando REX® como agente depresor del carbón asociado a la mena. Todas las pruebas de flotación fueron realizadas en una celda de flotación de laboratorio Agitair modelo LA-500 con celdas para tratar volúmenes de pulpa de 4 litros y 2.5 litros.

Las pruebas de flotación se las realizó simulando un proceso continuo de flotación de tres circuitos (rougher, scavenger y cleaner). Se utilizó el modelo matemático en base a los split factors, para simular una flotación industrial a partir de pruebas de laboratorio. La simulación sirve para poder predecir resultados finales como leyes, recuperaciones y ratios de concentración con un alto nivel de confianza.

Por lo general se recomiendan estos modelos cuando no se tienen más de una etapa de flotación

o no se tiene más de un producto, siempre considerando la fracción flotable para el cálculo de los split factors.

La formulación matemática y el esquema detallado del proceso se encuentran en los anexos, los resultados de esta formulación fue una expresión matemática para calcular el volumen de material que entra en el sistema considerando la alimentación y los flujos que retornan de las celdas de limpieza y scavenger. En la siguiente figura se encuentra un esquema resumido del sistema utilizado para flotar.

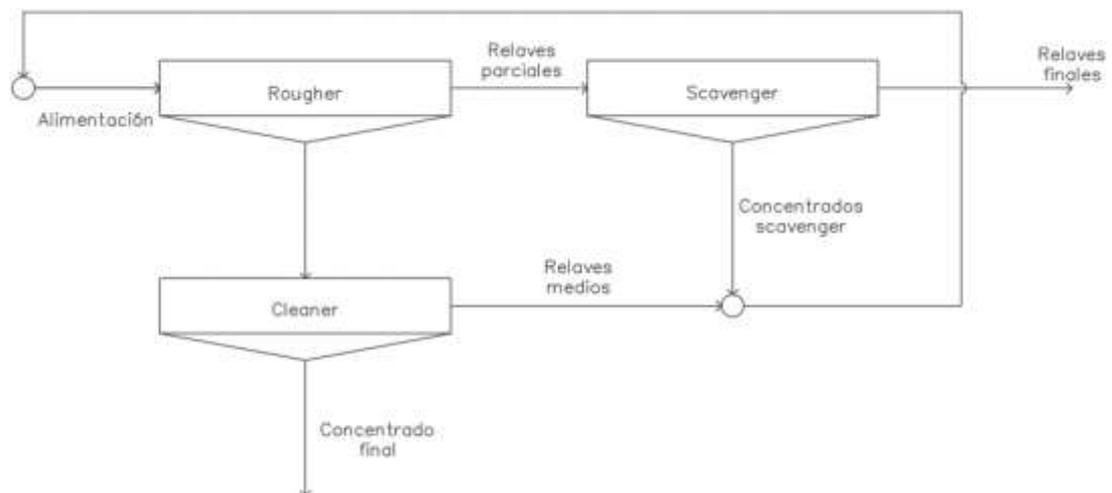


Figura 2.8 Esquema de proceso de flotación empleado para las pruebas.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

El material de cabeza fue triturado y pulverizado mediante una pulverizadora de anillos por tres minutos hasta llegar a una granulometría de pasante 80 % malla 60 (250 μm). La granulometría fue escogida de esta manera para evitar la formación de lamas por una molienda más fina.

Estos finos se comportan de manera coloidal o cercana a coloidal, mostrando una 'flotabilidad natural', y como tienen un efecto de revestimiento selectivo y también una floculación natural no selectiva, los concentrados se pueden contaminar con este material de ganga. Este efecto es mucho más pronunciado con los materiales carbonosos como grafito y carbones.

La masa de material utilizada para cada prueba de flotación fue de 2 kilos, donde se solo se realizó la variación de la concentración de REX® y colectores, así como la etapa en el proceso de flotación en la cual fueron introducidas las dosis. Las dosis de colectores, xantatos y espumantes utilizados en cada etapa se pueden observar en las siguientes tablas.

Tabla VI. Dosificaciones de reactivos utilizadas en pruebas de flotación, Ro (Rougher), SCV (Scavenger).

Prueba	FD-1	FD-2	FD-3	FD-4	FD-5	FD-6	FD-7	FD-8	FD-9	FD-10	FD-11	FD-12
Peso muestra inicial g	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
pH inicial	2.62	2.6	2.61	2.65	3.1	3.17	3.16	5.3	5.3	5.1	5.2	5.3
Cal kg/ton	1.740	12.107	12.068	9.497	1.259	1.808	3.494	-	-	-	-	-
pH final	5.1	4.34	5.08	6.17	5.33	5.28	6.14	5.3	5.3	5.1	5.2	5.3
Z-6 g/ton	750.0	750.0	750.0	750.0	750.0	937.5	937.5	937.5	937.5	937.5	937.5	937.5
REX®, Kg/ton	0.14	0.22	0.45	0.10	1.81	2.72	3.70	4.54	4.54	6.36	1.81	2.72
AR 1404 g/ton	66.10	66.10	66.10	66.10	66.10	66.10	66.10	73.71	66.10	66.10	66.10	66.10
AR 1208 gr/ton	66.10	67.14	66.53	66.43	66.87	66.94	67.92	73.71	66.95	66.76	66.72	66.16
MIBC g/ton	69.56	69.56	69.56	69.56	69.56	69.56	69.56	-	69.56	69.56	69.56	69.56
Acondicionamiento min	Ro:3 y SCV:2	Ro:5 y SCV:2	Ro:4 y SCV:2	Ro:4 y SCV:2	Ro:4 y SCV:2	Ro:4 y SCV:2						
Flotación min	Ro:3 y SCV:10											

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Las dosis de REX® fueron agregadas en varias etapas. Las 4 primeras pruebas (FD-1 a FD-2) se agregó REX® en cantidades mínimas en la limpieza de concentrado; las prueba FD-5 se agregó 2.2 Kg/ton en la etapa Rougher y la para la etapa Cleaner se agregó 0.2 Kg/ton con respecto a los 2 kilos agregados inicialmente y las siguientes pruebas, se agregó directamente 2.72 Kg/ton en la etapa de Rougher y 3.7 Kg/ton directo a la etapa Rougher.

Adicionalmente se realizaron pruebas de control sin usar REX® (FP-1 Y FP-2), para observar las mejores dosificaciones de colectores a utilizar en las siguientes pruebas y contrastar los resultados obtenidos en las flotaciones con REX®. Las dosificaciones utilizadas para estas pruebas se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla VII. Dosificación de reactivos utilizadas en pruebas sin REX®.

Prueba	FP-1	FP-2
Peso muestra g	2000	2000
pH inicial	2.9	3.82
Cal kg/ton	2.084	1.168
pH final	5.14	5.04
Z-6 g/ton	750.0	750.0
REX®, Kg/ton	0.00	0.00
AR 1404 g/ton	66.10	66.10
AR 1208 g/ton	66.95	66.95
MIBC g/ton	69.56	69.56
Acondicionamiento min	Ro:3 y SCV:2	Ro:3 y SCV:2
Flotación min	Ro:3 y SCV:8	Ro:3 y SCV:8

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Las imágenes del equipo de flotación utilizado en las pruebas se pueden observar en las siguientes imágenes.



Figura 2.9: Celda de flotación Agitair LA-500 utilizada en las pruebas de flotación.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

2.3.5.2. Pruebas de lixiviación

Las pruebas de lixiviación se las realizó a los concentrados obtenidos de las flotaciones realizadas con REX® en las pruebas FD-5 a FD-7, ya que en estas pruebas los concentrados salieron muy limpios de carbón. Se realizaron en botellas estándar de cianuración, con la misma concentración de cianuro por 24 h.

Cabe mencionar que estas pruebas preliminares sirven para observar las recuperaciones obtenidas antes realizar las pruebas utilizando el surfactante catiónico cloruro de benzalconio. Los parámetros de las pruebas se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla VIII. Parámetros utilizados en las pruebas de cianuración en concentrados preliminares.

Pruebas cianuración concentrados	FD-5	FD-6	FD-7
% solidos	11.6	11.6	11.6
CN- ppm	1500	1500	1500
Dilución	7.65	7.65	7.65
Agitación horas	24	24	24
Peso seco mineral Kg	0.070	0.072	0.059
H2O agregada L	0.530	0.530	0.530
Adición NaCN g	1.50	1.50	1.50

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Previamente fueron todos los concentrados fueron molidos a una granulometría promedio de 76.7 % - malla 200, para facilitar la liberación del contenido de oro. El control de las pruebas fue para verificar

el cianuro libre y el pH que debe mantenerse a 10.5 en promedio.

A partir de los resultados obtenidos en estas pruebas preliminares, se realizaron pruebas de cianuración, utilizando surfactante y lixiviaciones CIL. Se realizaron 3 ensayos, cada uno con 8 pruebas las cuales 4 eran lixiviaciones estándar con diferentes dosis de surfactante (0, 200 g/ton, 400 g/ton y 800 g/ton) y las 4 restantes con las mismas dosis de surfactante pero con carbón en lixiviación (CIL). Los parámetros utilizados para todos los ensayos se pueden encontrar a continuación.

Tabla IX. Parámetros utilizados en las pruebas de cianuración con surfactante en todos los ensayos.

% solidos	CN- ppm	Dilución	Agitación horas	Peso seco mineral Kg	H2O agregada L	Adición NaCN g	Peso carbón g
10	1500	9	24	0.1	0.9	2.54	20

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Para cada prueba sin carbón activado se tomaron muestras a diferentes horas para determinar la

cinética de cianuración y observar en qué momento se da el fenómeno del preg-robbing en la cianuración de cada muestra. Las muestras se tomaron en las siguientes horas: 1, 2, 4, 8, 16, 24.

Para las pruebas con carbón activado se tomó una muestra al final de la cianuración para observar el remanente de oro al final del proceso CIL. Posterior se filtró el relave y los carbones cargados fueron separados para su posterior análisis de contenido de carbón y absorción.

También se realizó ensayos de cianuración al material sin realizarse ningún pretratamiento (flotación) y a material concentrado de flotación sin REX® para observar el preg-robbing y las recuperaciones obtenidas en estas condiciones. Se realizó una lixiviación sin CIL y otra lixiviación con CIL para cada material con las mismas condiciones utilizadas en los otros ensayos de cianuración.

El objetivo de estas pruebas es para contrastar los resultados obtenidos en las pruebas realizando flotación con REX® y en las lixiviaciones con surfactante. Las botellas en donde se realizaron los ensayos de cianuración se muestran en las siguientes imágenes.



Figura 2.10 Botella de cianuración de 2 L utilizada en las pruebas de los ensayos.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

2.3.6. Equipos de análisis, control y preparación de muestras

Para este proyecto se utilizaron distintos equipos, utensilios e instrumentos para realizar control y mediciones necesarias en las

pruebas tanto de flotación, como en las pruebas de cianuración. Aparte de la cristalería de laboratorio variada utilizada durante las pruebas y ensayos, se utilizaron los siguientes equipos de análisis:

- Equipo de absorción atómica Buck Scientific modelo 210 VGP, utilizado para realizar los ensayos al fuego de muestras analizadas.



Figura 2.11 Equipo de absorción atómica.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

- Medidor potenciométrico de pH marca Hanna instruments modelo Hi-2210.



Figura 2.12 Equipo para realizar medidas potenciométricas de pH.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

- Horno de secado de muestras Indupak personalizado, cuya temperatura máxima es de 400 °C.



Figura 2.13 Horno de secado de muestras.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

- Agitador orbital marca Barnstead utilizado en las pruebas de preg-robbing para mantener agitada la muestra durante el ensayo.



Figura 2.14 Agitador orbital para pruebas preg-robbing.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

- Balanza analítica marca AWS modelo AL-201S, la cual tiene una capacidad máxima de medición de 200 g.



Figura 2.15 Balanza analítica para pesado.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

- Analizador de partículas por difracción láser Horiba LA-300 para determinar la granulometría de las muestras de los ensayos.



Figura 2.16 Equipo para determinar la granulometría.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

- Equipo de filtrado a presión de aire para filtrar muestras y facilitar la fase de secado.



Figura 2.17 Equipo de filtrado a presión de muestras.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del material

3.1.1. Identificación de especies minerales y material carbonosa

Las muestras de mano observadas poseen una textura esquistosa que ha sufrido alteraciones hidrotermales de baja sulfuración, debido a que no se observó contenido de carbonatos y además por la presencia de minerales magnéticos.

Los yacimientos de baja sulfuración son caracterizados por porcentaje bajo a medio de pirita, alteraciones adyacentes a las estructuras de cuarzo, sericita, illita y adularia. Poseen un porcentaje de medio a bajo de pirita y otros sulfuros como galena, esfalerita, calcopirita. Presencia de brechas magmáticas, vetas con fases cristalinas en profundidad y bandeadas a niveles someros.



Figura 3.1 Muestra de mano de la zona de estudio del proyecto.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

En la lámina delgada que se observa en la imagen 3.2, se puede observar una inter-estratificación original de la roca meta sedimentaria de grano muy fino transformada a una pizarra carbonosa, obsérvese las vetillas ampliadas en la siguiente imagen (figura 3.3).

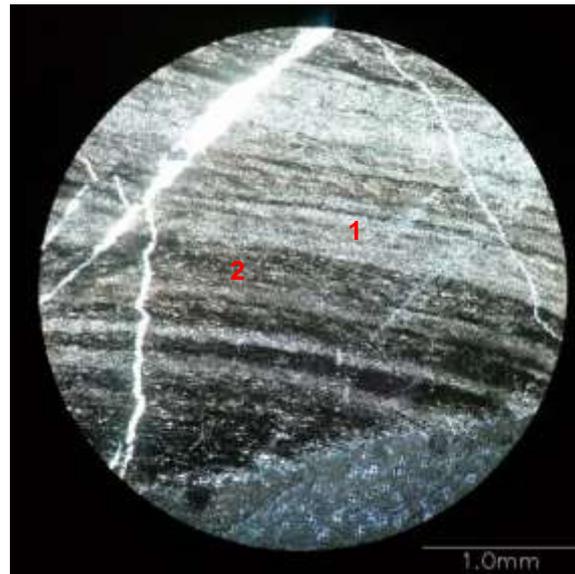


Figura 3.2 Lámina delgada de material carbonoso, en el punto 1 se observa estratos de arcillas y en el punto 2 estratos de materia carbonosa.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

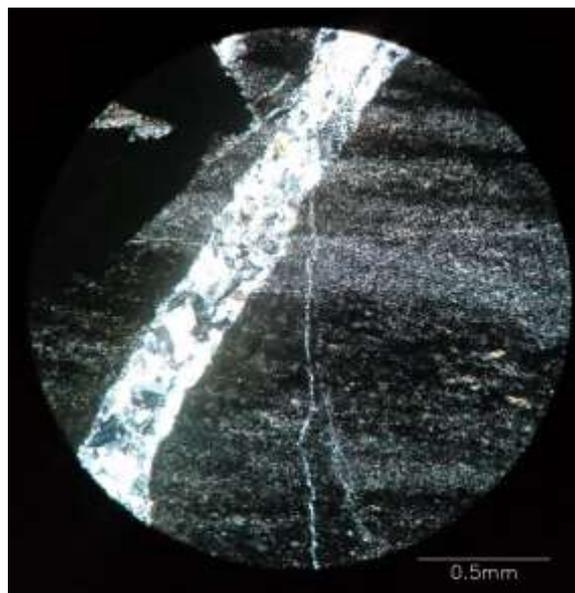


Figura 3.3 Ampliación de la imagen anterior, donde se observa las vetillas de cuarzo en la matriz de roca meta sedimentaria.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

La parte carbonosa puede ser descrita como liptodetrinita, el cual es un mineral del grupo liptinita, de granos de tamaño pequeño proveniente de fragmentación de otros minerales del mismo grupo como puede ser esporinita, cutinita, resinita, alginita y suberinita.

Sin embargo, algunas liptodetrinitas pueden proceder de algas unicelulares microscópicas, cuando presentan formas más regulares como lo afirma Littke and Rullkötter en un estudio de 1987.

El fracturamiento y fallamiento en el material favoreció la migración de fluidos hidrotermales. El relleno observado en la imagen está compuesto por cuarzo y sericita, donde también se pueden observar sulfuros (pirita) formada posteriormente, obteniéndose paragénesis. En la siguiente figura se observa lo explicado anteriormente.

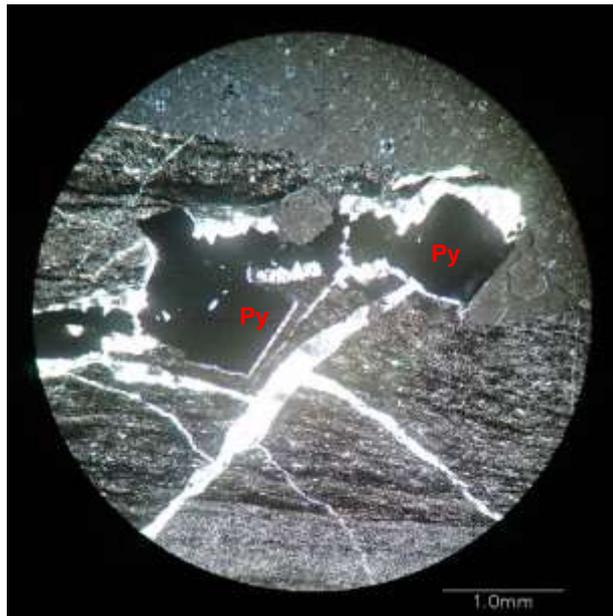


Figura 3.4 Se observa sulfuros (Py) incrustados en las vetillas del material carbonoso.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Se observó presencia de moscovita y sillimanita, minerales que nos indican presencia de metamorfismo. En la recristalización algunos minerales metamórficos, como el granate, la estaurolita y la andalucita, desarrollan cristales muy grandes. Por el contrario, minerales como la moscovita, suelen formar una gran cantidad de granos muy pequeños como se observó en las láminas delgadas. Otro mineral índice de metamorfismo es la sillimanita, presente en esquistos y micaesquistos graníticos. La presencia de moscovita y sillimanita nos indica que la roca es de carácter peralumínico, es decir, una roca con alto contenido de

óxido de aluminio en relación a la cantidad de potasio y sodio en la roca (concentración molar $(K_2O + Na_2O)/Al_2O_3 < 1$), lo que se corroboró más adelante en los análisis SEM de la muestra. Las imágenes más representativas se muestran a continuación.

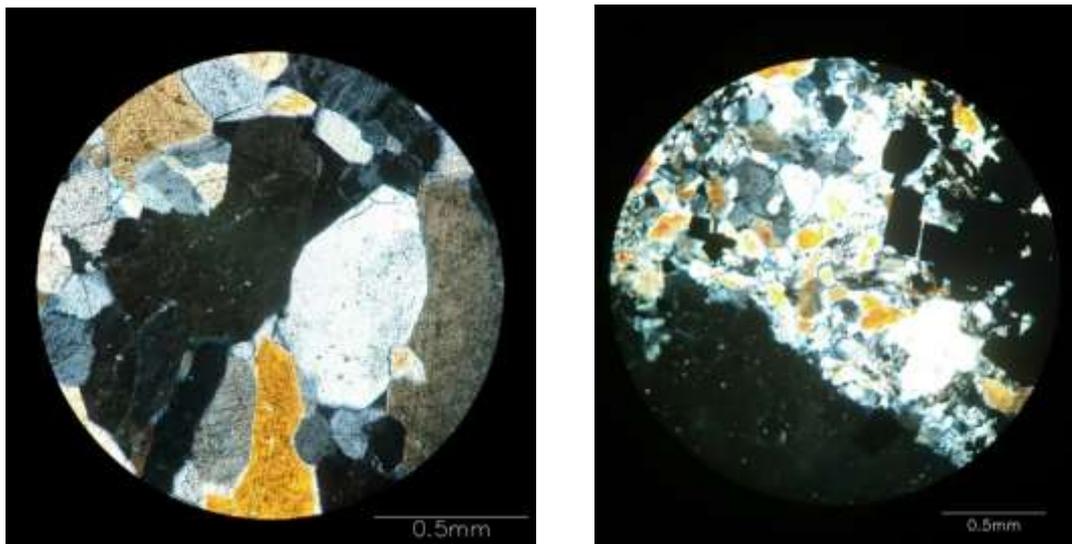


Figura 3.5 En la imagen de la derecha se observa moscovita (1), mientras que en la de la izquierda se pueden observar minerales de sillimanita (2).

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

3.1.2. Resultados de imágenes SEM de la mena

Se realizó el análisis de la muestra de cabeza de la mena mediante un microscopio de barrido electrónico. También se realizó análisis puntuales en la muestra para determinar porcentaje de elementos. Aquí se pudo conocer que lo que se pensaba originalmente en la hipótesis acerca del tipo material era

incorrecto. Los resultados completos de los análisis estarán adjuntos en los anexos del documento.

Los resultados muestran que la materia negra en la mena de la que se pensaba era algún tipo de carbón mineral resultó ser aluminosilicatos con un contenido bajo de carbón. En la siguiente imagen se analizó el supuesto material carbonoso obteniendo los resultados mostrados a continuación.

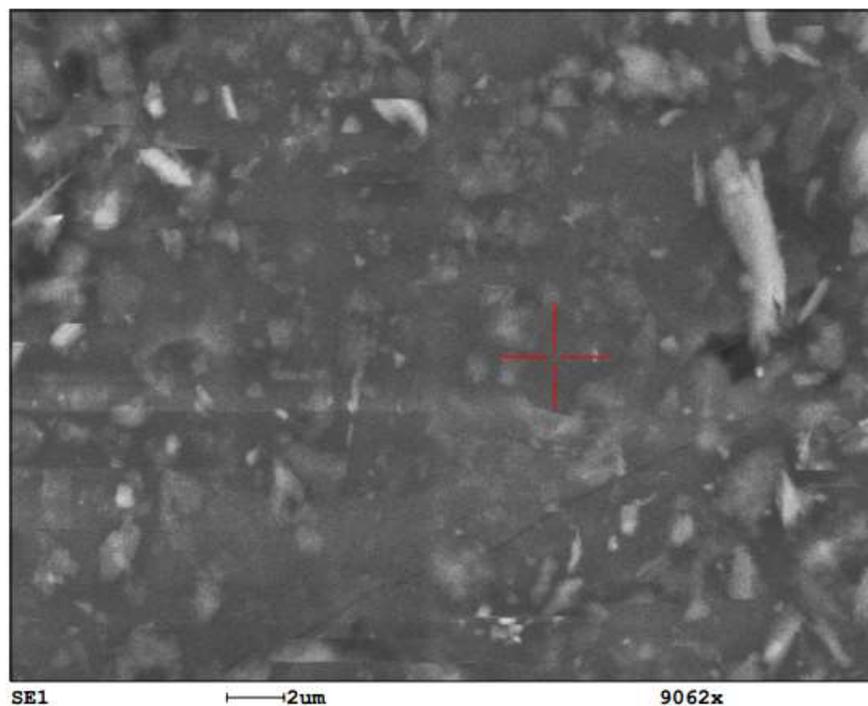


Figura 3.6 Análisis puntual de materia carbonosa asociada a la mena.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

El análisis indica que el contenido de carbón presente es de 3.70%, el cual es muy despreciable en comparación con el

contenido de silicio y oxígeno, el cual es de 53.3% y 39.14% respectivamente. El resto de los resultados porcentuales se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla X. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.6.

Elemento	Porcentaje peso	Porcentaje atómico
C	3.70	6.43
O	39.14	51.14
Al	2.88	2.23
Si	53.30	39.67
K	0.99	0.53

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

En la siguiente imagen se observa una partícula de pirita asociada con material carbonoso. En esta imagen se pueden observar concentraciones altas de aluminio, silicio y oxígeno, en proporciones muy características de los aluminosilicatos. También se pudo observar hierro y azufre, probablemente por la asociación con la pirita.

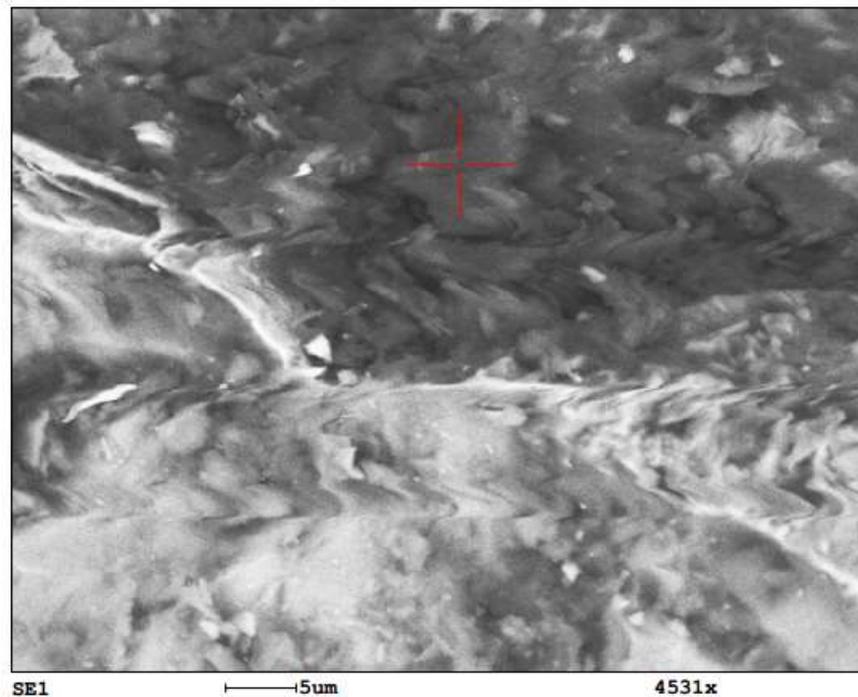


Figura 3.7 Análisis puntual de materia carbonosa asociada a la mena.

Tabla XI. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.7.

Elemento	Porcentaje peso	Porcentaje atómico
C	9.47	15.28
O	44.91	54.37
Na	0.34	0.28
Mg	0.39	0.31
Al	14.77	10.61
Si	22.43	15.47
S	0.98	0.59
K	5.11	2.53
Fe	1.60	0.56

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

En esta imagen se analizó las partículas de la materia carbonosa en una escala de 2 μm , donde se puede notar que las partículas

poseen una forma de hojas o láminas, hábito es característico de los filosilicatos. Esta estructura se puede observar en varias partículas en la figura 3.8, en los puntos 1 y 2.



Figura 3.8 Análisis puntual de materia carbonosa asociada a la mena, observar partículas 1 y 2 con estructura de hojas en la imagen.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Tabla XII. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.8 en el punto 1.

Elemento	Porcentaje peso	Porcentaje atómico
C	7.84	13.95
O	33.23	44.4
Na	0.29	0.27
Mg	0.55	0.48
Al	16.46	13.04
Si	25.76	19.61
S	2.93	1.95

K	8.29	4.53
Fe	8.29	1.78

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Como se puede observar en la tabla, se repiten valores altos de concentración de aluminio, silicio y oxígeno característicos de aluminosilicatos. También se observa un porcentaje de carbono del 7.84%, indicando que efectivamente hay presencia de este elemento posiblemente como carbón mineral.

De acuerdo a lo observado en los análisis antes descritos, se puede ver que la concentración promedio de carbono en la ganga es de 7%, porcentaje suficiente para generar preg-robbing en el proceso de cianuración.

3.2. Análisis de difracción de rayos X (DRX) del material de cabeza

Se realizó dos tipos de análisis de la muestra de cabeza, uno cuantitativo y otro cualitativo, con el objetivo de obtener cuáles son las especies minerales predominantes presentes en la muestra y su distribución porcentual en la misma. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla XIII. Resultados obtenidos del análisis de DRX en la muestra.

Especies minerales presentes	Porcentaje %
Cuarzo	59.6
Grafito	17.2
Pirita	6.5
Moscovita	6.5
Amorfos	10.2

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Como se puede observar, lo más relevante de estos resultados es el contenido de una fase cristalina dihexagonal del grafito. Esto corrobora que existe un material carbonoso causante del preg-robbing, y corrobora los resultados obtenidos en el análisis petrográfico y microscopía de barrido electrónico, donde se observó presencia de material con contenido de carbono que no se podía identificar correctamente.

Debido a los resultados obtenidos en el análisis petrográfico y complementando con la información del análisis DRX, se determinó que el material carbonoso causante del preg-robbing es un esquisto grafítico o grafitoso.

3.3. Resultados pruebas de flotación

Los resultados de las pruebas de flotación se encuentran en la siguiente tabla, en los cuales se puede observar la recuperación y las leyes obtenidas en los concentrados de cada prueba.

Tabla XIV. Resultados de pruebas de flotación.

Prueba	Cabeza			Concentrado			Relave			
	Au gr/ton	Peso g	% Peso	Au gr/ton	Ratio Conc.	% Peso	Recuperación %	Au gr/ton	% Peso	Recuperación %
FP-1	8.23	1977.63	100.00	96.61	12.53	7.26	92.26	0.70	83.66	7.74
FP-2	8.23	1997.89	100.00	78.39	13.55	6.68	89.57	0.73	83.84	10.43
FD-1	8.03	1999.96	100.00	77.35	10.33	8.44	93.32	0.59	78.75	6.68
FD-2	7.58	1969.13	100.00	89.31	12.44	6.60	94.73	0.43	75.54	5.27
FD-3	7.63	1987.15	100.00	99.81	14.09	5.84	92.83	0.59	76.39	7.17
FD-4	8.30	1990.08	100.00	130.11	16.58	4.98	94.47	0.49	77.53	5.53
FD-5	7.45	1977.03	100.00	92.22	13.12	6.60	94.29	0.46	79.97	5.71
FD-6	7.21	1974.77	100.00	88.79	13.08	6.71	93.02	0.46	81.02	5.84
FD-7	7.15	1946.39	100.00	93.16	14.03	6.22	92.94	0.54	80.97	7.06
FD-9	7.79	1974.56	100.00	114.32	15.77	5.52	93.02	0.58	81.59	6.98
FD-10	7.77	1980.36	100.00	136.90	19.24	4.48	91.54	0.69	81.75	8.46
FD-11	7.92	1981.33	100.00	110.68	15.04	5.93	92.87	0.61	83.23	7.13
FD-12	7.82	1998.33	100.00	127.24	18.17	4.86	89.48	0.87	83.52	10.52

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

En el gráfico 3.9, se puede observar de manera comparativa la recuperación de oro con las leyes obtenidas en cada concentrado de flotación y las dosificaciones de REX® para cada prueba, mientras que en la gráfico 3.10, se puede observar los ratios de cada prueba y la dosificación de REX® utilizada en cada flotación con el objetivo de observar el efecto de la REX® en la concentración.

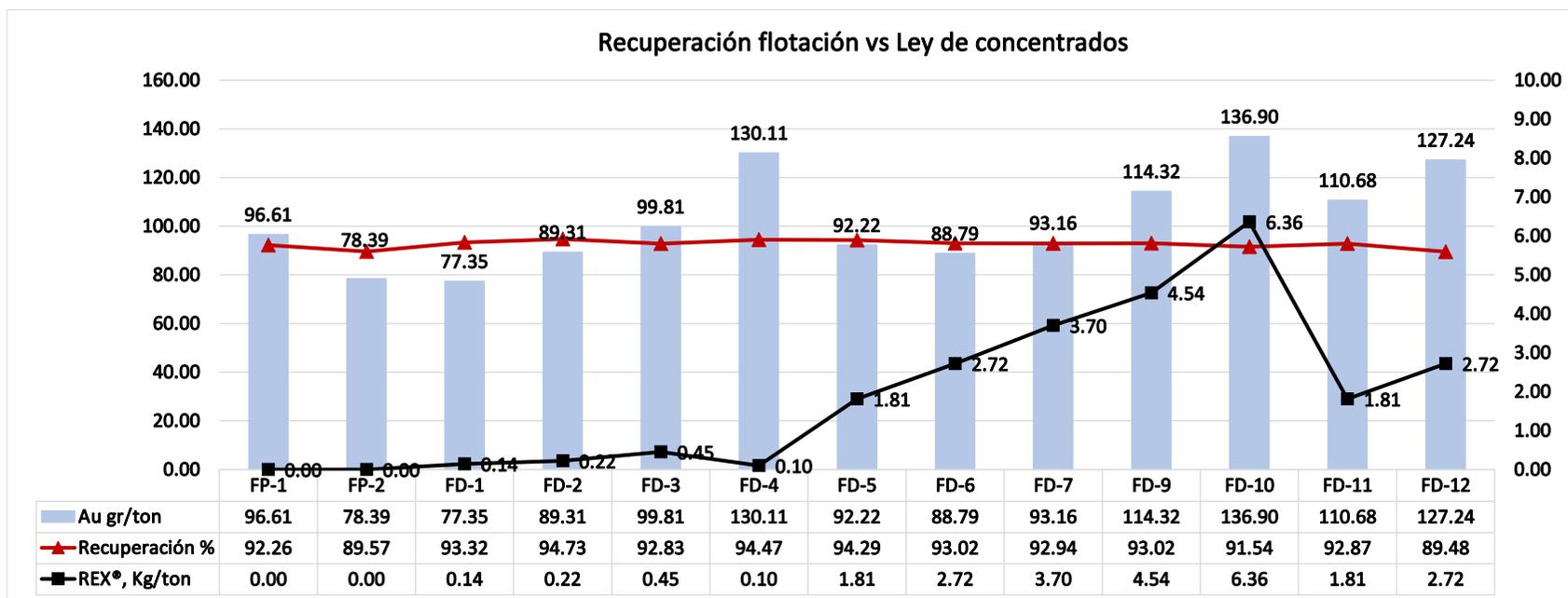


Figura 3.9 Gráfica comparativa de la recuperación y la ley de los concentrados de flotación.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

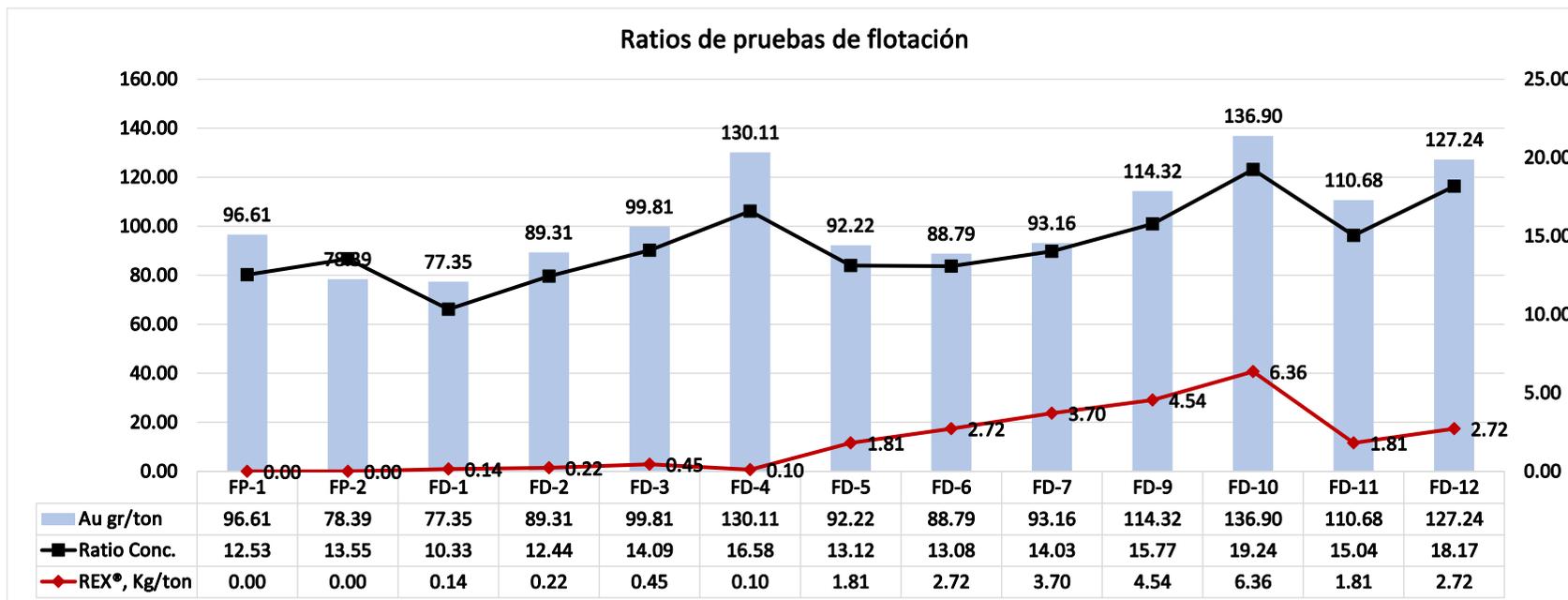


Figura 3.10 Ratios de concentración en comparación con las dosis de REX®.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Como se puede observar las recuperaciones no varían mucho entre las flotaciones realizadas, independientemente de la dosificación de REX® agregada en cada prueba los valores de recuperaciones se encuentran por encima del 89% en todos los casos. Se puede observar que a medida que se aumentan las dosis de REX® se observa una ligera disminución de recuperación (observar de FD-5 a FD-10). Se excluyó de los resultados el análisis FD-8, debido que en este ensayo no se utilizó espumante en la flotación rougher y se trató de compensar este error aumentando el tiempo de sacado de espuma más tiempo, cambiando las condiciones establecidas para todos las pruebas realizadas. Los resultados de la prueba FD-8 sin embargo se pueden encontrar en los anexos.

En promedio la recuperación es de 92.92% para las pruebas donde se utilizó la REX®, las leyes de los concentrados muestran una relación con las dosis de REX®, a medida que se aumenta las dosis de REX®, las leyes de los concentrados también. El concentrado FD-4 proviene de la muestra con la ley de cabeza más alta de todos los ensayos (observar la tabla 4.3). Observando los ratios de concentración vs las dosis de REX® se puede notar que los ratios aumentan a medida que la dosis de concentraciones son altas.

Se obtuvieron mejores resultados en las flotaciones agregando REX® en la fase rougher, al agregar REX® en esta etapa se obtuvieron

concentrados más limpios a simple vista, resultado que se corroboró realizando las pruebas de preg-robbing (PR %) correspondientes.

3.3.1. Preg-robbing de concentrados de flotación

Se realizaron pruebas de preg-robbing para cada uno de los concentrados obtenidos de las flotaciones. Las pruebas se realizaron siguiendo la metodología propuesta anteriormente basada en el ensayo desarrollado por Barrick Gold Mines Incorporated (BGMI).

Los resultados de los análisis de todos los concentrados de flotación se encuentran a continuación en la tabla 3.6.

Tabla XV. Resultados de ensayos preg-robbing.

Concentrado	Concentración inicial ppm	Au lixiviado ppm	Concentración final ppm	Preg-robbing PR%
FP-1	5.34	1.83	4.98	41.01
FP-2	5.34	1.98	5.35	36.89
FD-1	5.1	0.85	3.5	48.04
FD-2	5.1	1.23	4.3	39.80
FD-3	5.1	0.76	4	36.47
FD-4	5.1	1.2	3.7	50.98
FD-5	5.6	1.68	6.67	10.89
FD-6	5.6	1.14	6.20	9.64
FD-7	5.6	1.38	6.49	7.02
FD-9	5.34	1.63	6.3	12.55
FD-10	5.3	0.55	5.64	3.96

FD-11	5.4	2.78	7.5	12.59
FD-12	5.4	3.1	8	9.26

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Los resultados muestran claramente que la REX® deprime de manera efectiva la materia carbonosa causante del preg-robbing. Al realizar una flotación sin REX® como en el caso de las pruebas FP-1 y FP-2, se puede observar que el preg-robbing disminuye en un 59% y 63.11% respectivamente.

El preg-robbing en las pruebas donde se utilizó REX® solo en la fase de limpieza (cleaner), no resultaron satisfactorias en cuanto a reducción de preg-robbing, a pesar que se observó que a dosis más altas de REX® utilizadas el preg-robbing disminuye (observar FD-1 hasta FD-4).

Se observaron mejores resultados cuando se utilizó la REX® en la etapa de rougher. Aquí el preg-robbing disminuyó considerablemente a valores por debajo del 15%. Después se probó utilizando REX® en ambas fases, rougher y cleaner, como se puede observar en la prueba FD-5 y en las pruebas FD-11 y FD-12, la adición de REX® en la fase cleaner parece tener mejores resultados cuando se va a lixiviar el material. Esto se puede evidenciar en los resultados de la lixiviación del concentrado FD-5, donde se obtuvo una mejor recuperación que en los otros concentrados. En el siguiente gráfico se puede

observar la concentración de REX® utilizada en cada prueba y el preg-robbing obtenido donde se observa la tendencia antes mencionada de menor preg-robbing a mayores concentraciones de REX®.

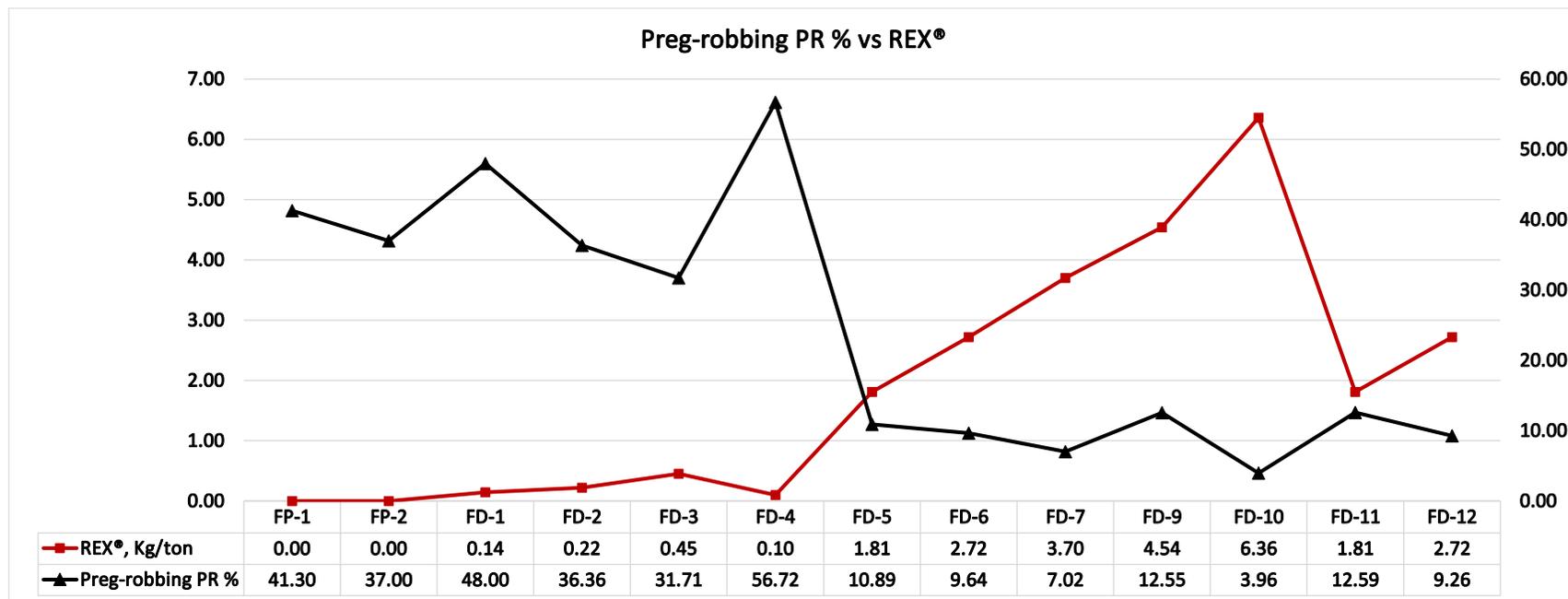


Figura 3.11 Preg-robbering en comparación con las dosis de REX®.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

3.4. Resultados imágenes SEM de concentrados

De los concentrados obtenidos, se realizó el análisis mediante microscopio de barrido electrónico. El concentrado analizado fue el obtenido en las pruebas de flotación FD-11, en la cual se utilizó 1.81 kg/ton de REX® en la fase rougher y 1.6 en la fase de limpieza (cleaner). En los análisis se observó que los concentrados estaban bastante limpios de material carbonoso y ganga, observándose granos de pirita (ver figura 4.3). Se observó materia carbonosa asociada a la superficie de los granos de pirita, la cual no se puede separar en la flotación a menos que se utilice una granulometría más fina que sería contraproducente ya que se puede dar la formación de lamas que se irían con el concentrado rougher ensuciándolo más.

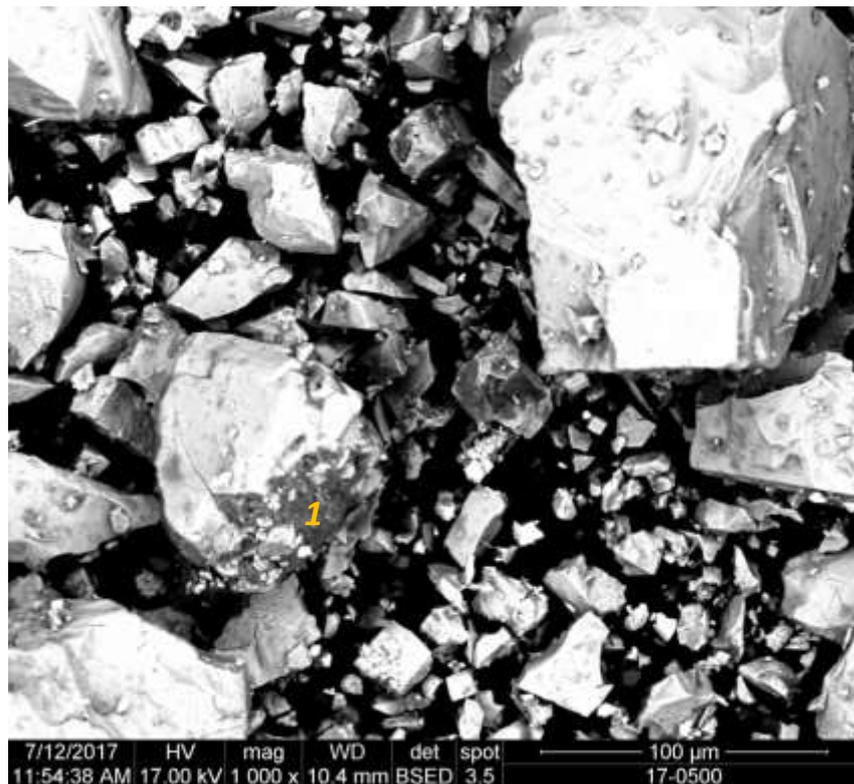


Figura 3.12 Imagen de concentrado obtenido por microscopía de barrido electrónico.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

En la zona indicada con el número 1, se puede observar el material carbonoso asociado a una de las caras de la pirita. El análisis puntual realizado en el punto mostrado en la imagen 3.12 corrobora los resultados obtenidos en el análisis de las muestras de cabeza acerca del tipo de material que se tiene. El resultado del análisis puntual de elementos revela que se trata de aluminosilicatos con contenido bajo de carbón y son mostrados en la siguiente tabla 3.7.

Tabla XVI. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.12

Elemento	Porcentaje peso	Porcentaje atómico
C	3.48	6.17
O	39.93	53.10
Mg	0.68	0.60
Al	18.61	14.67
Si	25.50	19.24
S	0.88	0.58
K	8.87	4.82
Fe	2.15	0.82

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Se observó un conglomerado formado por cristales cúbicos de pirita y materia carbonosa, donde se pudo identificar un punto donde la materia carbonosa tiene valores altos de concentración de carbono. En esta imagen analizada se muestra como la materia carbonosa está asociada e manera importante con nuestro mineral de interés. La siguiente tabla muestra los resultados del análisis puntual de la imagen 3.13.

Tabla XVII. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.13.

Elemento	Porcentaje peso	Porcentaje atómico
C	64.27	76.78
O	17.32	15.53
Al	1.89	1.01
Si	3.98	2.03
S	7.18	3.21
K	0.58	0.21
Fe	4.78	1.23

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

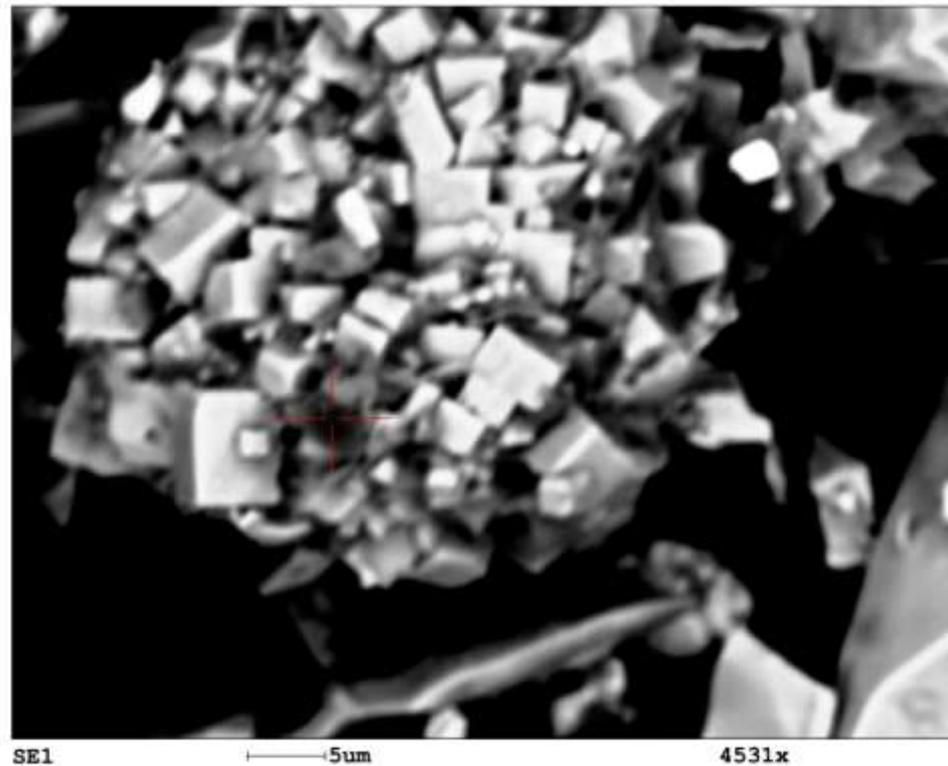


Figura 3.13 Imagen de conglomerado de pirita y materia carbonosa en concentrado obtenido por microscopia de barrido electrónico.

Los valores altos de carbono en este conglomerado muestran que dentro de la matriz carbonosa se pueden encontrar rastros de lo que parece ser carbón mineral. Se analizó otro punto en el mismo conglomerado donde se obtuvieron valores representativos de aluminio, silicio y carbono, demostrando otra vez la asociación fuerte de las arcillas con contenido de carbono.

Tabla XVIII. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual de muestra de imagen 3.13

Elemento	Porcentaje peso	Porcentaje atómico
C	24.54	42.26
O	21.33	27.57
Al	4.17	3.19
Si	7.05	5.19
S	20.56	13.26
K	1.51	0.80
Fe	20.84	7.72

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

La imagen muestra el punto donde fueron tomados los datos, en este punto se observa un porcentaje de carbono mayor al 20%, el cual es menor al resultado del análisis obtenido en la imagen 3.12. Con esto se determina que el material carbonoso que afecta la recuperación en el proceso de cianuración está conformado por aluminosilicatos y un contenido variable de carbono, ambos materiales los cuales han sido estudiados como causantes del fenómeno de preg-robbing por otros autores (Tremolada, Dzioba, Bernardo-sánchez, & Menéndez-aguado, 2010).

3.4.1. Análisis de difracción de rayos X (DRX) del material concentrado

Se realizó dos tipos de análisis de la muestra de concentrado obtenido de flotar con REX®, uno cuantitativo y otro cualitativo, con

el objetivo de obtener cuales son las especies minerales predominantes presentes en la muestra y su distribución porcentual en la misma. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla XIX. Resultados obtenidos del análisis de DRX en la muestra.

Especies minerales presentes	Porcentaje %
Pirita	90.4
Amorfos	9.6

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Como se puede observar, los resultados muestran que el concentrado en gran parte es pirita. Lo que nos indica que la flotación es bien efectiva a la hora de concentrar y separar nuestro mineral de interés de la ganga. El 9.6% de amorfos en el concentrado puede estar conformado por el material causante del preg-robbing el cual no puede ser determinado por análisis DRX y se necesitan otros tipos de análisis.

3.5. Resultados pruebas de lixiviación

3.5.1. Resultados de pruebas de lixiviación de control (cabeza y concentrados sin uso de REX®)

Adicional a las pruebas preliminares de concentrados y a las pruebas con surfactante y lixiviación CIL, se realizaron pruebas de cianuración al material de cabeza directamente y a concentrados de flotación obtenidos sin el uso de REX® con el objetivo de llevar un control y realizar una comparación de los resultados. La granulometría que se utilizó para ambos ensayos fue pasante 90% malla 200 (75 μm), los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla XX. Resultados de recuperaciones ensayos preliminares.

Resultados pruebas preliminares		
Concentrado	Recuperación máxima	Recuperación final (24 horas)
Cabeza	36.09 %	9.84%
Concentrado sin dex	12.19 %	12.76 %

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Las recuperaciones de ambos ensayos fueron muy pobres, obteniendo recuperaciones por debajo del 15% en ambos casos. Aquí se puede evidenciar el efecto contraproducente que tiene el preg-robbing en la cianuración, disminuyendo la recuperación de oro de manera drástica a valores en los que se baja toda la eficiencia del proceso de tratamiento metalúrgico.

3.5.2. Resultados de ensayos preliminares de concentrados tratados con REX®

Se analizaron los resultados de las pruebas previas a cianuración con surfactante utilizando los concentrados más limpios obtenidos (FD-5, FD-6 y FD-7). En el concentrado de FD-5 se alcanzó 87.3 % de recuperación de oro a las 2 horas de empezado el proceso en comparación con los concentrados FD-6 y FD-7 que solo llegan a 77 -75% de disolución del oro. Eso se debe probablemente que al agregarse REX® en la fase de limpieza (FD-5) el exceso crea un efecto de pasivación de la superficie del carbón retardando el efecto preg-robbing de la mena.

Al llegar a las 24 horas la recuperación de oro fue de 70.21% para el concentrado FD-5, 67.21% para el concentrado FD-6 y 63.00% en el concentrado FD-7. La recuperación final del concentrado FD-5 es mayor a los concentrados posteriores (FD-7, FD-6), al parecer la adición de REX® en la etapa cleaner tiene un impacto positivo disminuyendo el contenido de carbón o actuando de alguna manera pasivando la superficie del carbón como se dijo anteriormente, a pesar que de todos los concentrados el FD-5 es el que obtuvo un mayor porcentaje de

preg-robbing en los ensayos. Los resultados resumidos se pueden observar en la siguiente tabla, y los gráficos de cinética de cianuración se encuentran en los anexos.

Tabla XXI. Resultados de recuperaciones ensayos preliminares.

Resultados pruebas preliminares		
Concentrado	Recuperación máxima	Recuperación final (24 horas)
FD-5	87.29 %	70.21%
FD-6	77.21 %	67.56%
FD7	75 %	63%

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

3.5.3. Resultados ensayos 1 con surfactante

Como se mencionó en la metodología, las siguientes lixiviaciones se las realizó utilizando concentrados obtenidos utilizando las dosis de REX® y colectores de la prueba FD-5. El preg-robbing promedio con el que se trabajó con estos concentrados fue de 12.7%, valor mucho más bajo al preg-robbing inicial.

Se escogió esta dosis a pesar que ha mayor cantidad de REX® agregada se reduce más el preg-robbing, porque se observó que ha mayor dosis de REX® se observa una ligera disminución de la recuperación, también el objetivo es diseñar un proceso de tratamiento que sea aplicable a escala industrial, y aumentar las

dosis de REX® significa aumentar los costos de tratamiento, por lo que se prefiere trabajar con dosis bajas de REX®.

El ensayo 1 se lo trabajó con una granulometría de 77% pasante malla 200 (75 µm). Los resultados obtenidos fueron muy similares a los obtenidos en las pruebas preliminares del cianuración del concentrado FD-5. Sin embargo, se observa que a mayores concentraciones de surfactante, la recuperación máxima obtenida disminuye, así como la recuperación final de la lixiviación, en la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos, mientras que las cinéticas de cianuración se encuentran en los anexos.

Tabla XXII. Resultados de recuperaciones finales para ensayo 1

Resultados ensayo 1		
Dosis surfactante	Recuperación máxima	Recuperación final (24 horas)
200	87.05 %	72.65%
400	77.24 %	67.42%
800	68.73 %	68.07%

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Como se puede observar las recuperaciones máximas se dan a las 2 horas de haber realizado la lixiviación en todas las pruebas. La recuperación máxima se dio en la primera prueba con las dosis de surfactante más bajas (87.05%).

A medida que la dosis de surfactante aumenta, se tiene una disminución de la recuperación máxima en las siguientes pruebas (77.24% y 68.73% respectivamente). En la recuperación final, todas las pruebas obtuvieron recuperaciones por encima de 67%, contrastando con recuperación en concentrados sin el uso de REX® en los cuales se obtuvo recuperaciones de 12.76%.

3.5.4. Resultados ensayos 2 con surfactante

El ensayo 2 se lo trabajó con una granulometría de 57% malla 200, esta granulometría no fue la más óptima y no se obtuvieron resultados de recuperación buenos debido a que no se produjo la liberación completa del oro para que este se lixivie.

Independiente de la recuperación final la que a su vez fue recuperación máxima, al igual que en los anteriores ensayos se ve una tendencia a disminuir la recuperación a medida que las dosis de surfactante aumentan. Las recuperaciones máximas también disminuyen en dosis de surfactante mayores, los resultados se muestran a continuación.

Tabla XXIII. Resultados de recuperaciones finales para ensayo 2

Resultados ensayo 2	
Dosis surfactante	Recuperación final (24 horas)
200	60.74%
400	36.85%
800	19.24%

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

3.5.5. Resultados de ensayos 3 con surfactante

El ensayo 3 fue realizado con una granulometría 82% pasante malla 200 (75 μ m). Los resultados salieron muy similares a los del ensayo 1, obteniéndose buenas recuperaciones por encima del 60%.

Se observó en este ensayo que el surfactante no mejoró la recuperación como también se ha observado en los ensayos anteriores. Ha medida que la dosis de surfactante aumenta, la recuperación final, así como la recuperación máxima, disminuyen.

Tabla XXIV. Resultados de recuperaciones finales para ensayo 3

Resultados ensayo 2		
Dosis surfactante	Recuperación máxima	Recuperación final (24 horas)
200	82.58 %	75.07%
400	72.34 %	62.78%
800	70.97 %	68.24%

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Todos los ensayos se los trató de trabajar a la granulometría de 80% pasante malla 200 (75 μm), ya que estudios previos realizados con el material indicaban que esta era la granulometría óptima para tener un recuperación eficiente.

En el ensayo 2 no se utilizó esta granulometría y no se obtuvieron las recuperaciones esperadas, como si se observó en las pruebas preliminares y en los ensayos 1 y 3. Al final se puede observar que la acción del surfactante no tiene ningún impacto positivo en la recuperación, y que al menos el surfactante catiónico utilizado no probó tener la capacidad de pasivar las partículas de la materia causante del preg-robbing, y parece afectar de alguna manera la cianuración. En el siguiente gráfico se pueden observar las recuperaciones finales para cada dosis de surfactante en cada ensayo.

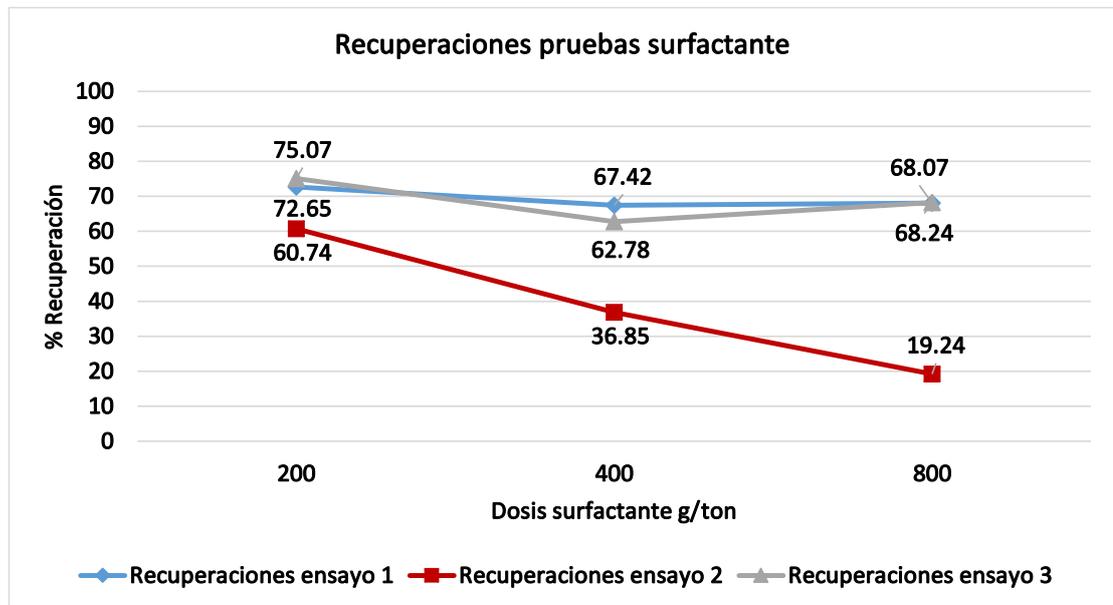


Figura 3.14 Resultados de ensayos con surfactante.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

3.5.6. Resultados ensayos CIL

Se realizaron pruebas CIL de manera preliminar al material sin realizarle ningún tratamiento previo y a un concentrado obtenido de un proceso de flotación sin usar REX®. Los resultados muestran que hubo una mejoría con respecto a una lixiviación sin carbón, sin embargo las recuperaciones obtenidas son menores al 65%. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla XXV. Resultados de lixiviaciones CIL para material sin tratamiento y concentrado sin REX®.

<i>Ensayo</i>	<i>Pruebas</i>	<i>Ley Au (gr/ton)</i>	<i>Finos (μg)</i>	<i>Ley de Liquido (gr/M³)</i>	<i>Ley solido (gr/ton) Calculada</i>	<i>Ley total (gr/ton)</i>	<i>Disolución %</i>	<i>Peso carbón (gr)</i>	<i>ley Au (gr/Kg)</i>	<i>Finos (μg)</i>	<i>Absorción (%)</i>	<i>Recuperación total (%)</i>
Preliminar	Cabeza	8.23	823.00	0.03	3.73	4.00	54.6%	15.90	0.0266	422.70	94.0%	51.36%
Preliminar	Concentrado	65.94	6,594.00	0.06	23.73	24.27	64.0%	20.04	0.2079	4,166.62	98.7%	63.19%

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Se puede observar que la acción del carbón activado es muy fuerte debido a su elevada absorción en comparación con cualquier material causante de preg-robbing. Sin embargo, utilizar solo carbón activado en lixiviación como único método para suprimir el efecto de preg-robbing solo sirve para menas con un grado de preg-robbing medio a bajo.

Tal como se observa en los resultados, es necesario realizar un pretratamiento previo como flotación para obtener mejores resultados en las recuperaciones utilizando carbón activado en lixiviación (CIL). En las siguiente graficas se pueden observar la comparación de las recuperaciones sin CIL y con CIL.

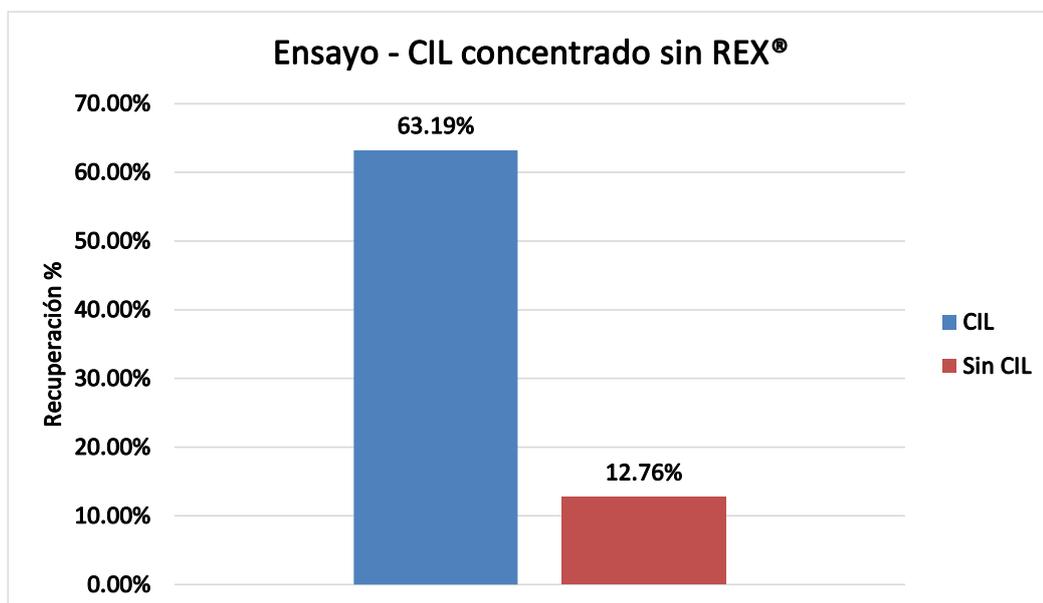
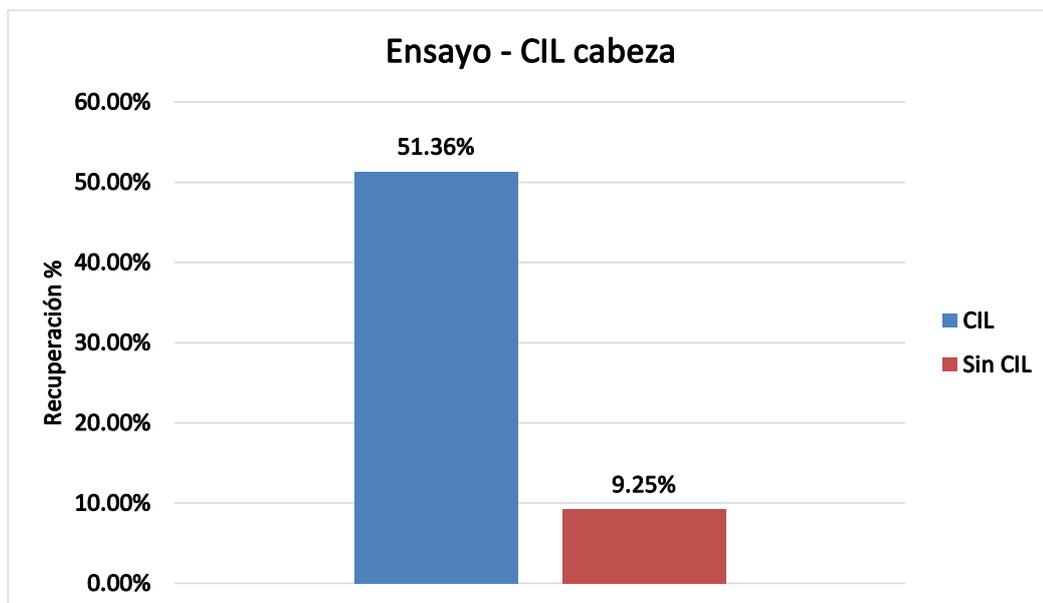


Figura 3.15 Comparación recuperaciones lixiviaciones con CIL (arriba) y sin CIL (abajo) a distintas concentraciones para material sin tratamiento previo y para concentrado de flotación sin REX®.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Las pruebas realizadas con el método de recuperación de carbón en lixiviación (CIL) tuvieron mejores resultados que los ensayos realizados con una cianuración estándar. El carbón en la solución lixivante compite de manera efectiva con la materia causante del preg-robbing, por su elevado nivel de absorción. En las siguientes tablas se encuentran los resultados de los ensayos con CIL.

Tabla XXVI. Resultados de lixivaciones CIL para ensayo 1.

<i>Dosis surfactante g/ton</i>	<i>% - 200M</i>	<i>Ley Au (gr/ton)</i>	<i>Finos (µg)</i>	<i>Ley de Liquido (gr/M³)</i>	<i>Ley solido (gr/ton) Calculada</i>	<i>Ley total (gr/ton)</i>	<i>Disolución %</i>	<i>Peso carbón (gr)</i>	<i>ley Au (gr/Kg)</i>	<i>Finos (µg)</i>	<i>Absorción (%)</i>	<i>Recuperación total (%)</i>
0	77	68.75	6,875.00	0.12	7.68	8.76	88.8%	19.80	0.3030	5,999.40	98.2%	87.26%
200	77	68.75	6,875.00	0.11	7.77	8.76	88.7%	19.80	0.3030	5,999.40	98.4%	87.26%
400	77	68.75	6,875.00	0.13	7.65	8.82	88.9%	19.80	0.3027	5,992.80	98.1%	87.17%
800	77	68.75	6,875.00	0.14	8.42	9.68	87.8%	19.80	0.2983	5,907.00	97.9%	85.92%

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Tabla XXVII. Resultados de lixiviaciones CIL para ensayo 2.

<i>Dosis surfactante g/ton</i>	<i>% - 200M</i>	<i>Ley Au (gr/ton)</i>	<i>Finos (µg)</i>	<i>Ley de Liquido (gr/M³)</i>	<i>Ley solido (gr/ton) Calculada</i>	<i>Ley total (gr/ton)</i>	<i>Disolución %</i>	<i>Peso carbón (gr)</i>	<i>ley Au (gr/Kg)</i>	<i>Finos (µg)</i>	<i>Absorción (%)</i>	<i>Recuperación total (%)</i>
0	60	65.94	6,594.00	0.13	10.50	11.67	84.1%	19.80	0.2741	5,427.38	97.9%	82.31%
200	60	65.94	6,594.00	0.20	10.47	12.27	84.1%	19.80	0.2711	5,366.79	96.8%	81.39%
400	60	65.94	6,594.00	0.30	14.50	17.20	78.0%	19.80	0.2462	4,873.97	94.8%	73.92%
800	60	65.94	6,594.00	0.33	25.51	28.48	61.3%	19.80	0.1892	3,745.57	92.7%	56.80%

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Tabla XXVIII. Resultados de lixiviaciones CIL para ensayo 3.

<i>Dosis surfactante g/ton</i>	<i>% - 200M</i>	<i>Ley Au (gr/ton)</i>	<i>Finos (µg)</i>	<i>Ley de Liquido (gr/M³)</i>	<i>Ley solido (gr/ton) Calculada</i>	<i>Ley total (gr/ton)</i>	<i>Disolución %</i>	<i>Peso carbón (gr)</i>	<i>ley Au (gr/Kg)</i>	<i>Finos (µg)</i>	<i>Absorción (%)</i>	<i>Recuperación total (%)</i>
0	82	65.94	6,594.00	0.11	10.12	11.11	84.7%	20.00	0.2742	5,483.33	98.2%	83.16%
200	82	65.94	6,594.00	0.11	12.28	13.27	81.4%	20.00	0.2633	5,266.67	98.2%	79.87%
400	82	65.94	6,594.00	0.12	9.19	10.27	86.1%	20.00	0.2783	5,566.67	98.1%	84.42%
800	82	65.94	6,594.00	0.15	11.26	12.61	82.9%	20.00	0.2667	5,333.33	97.5%	80.88%

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

En las siguientes imágenes se pueden observar una comparación entre las recuperaciones de las lixiviaciones CIL con surfactante y las lixiviaciones con surfactante sin utilizar CIL.

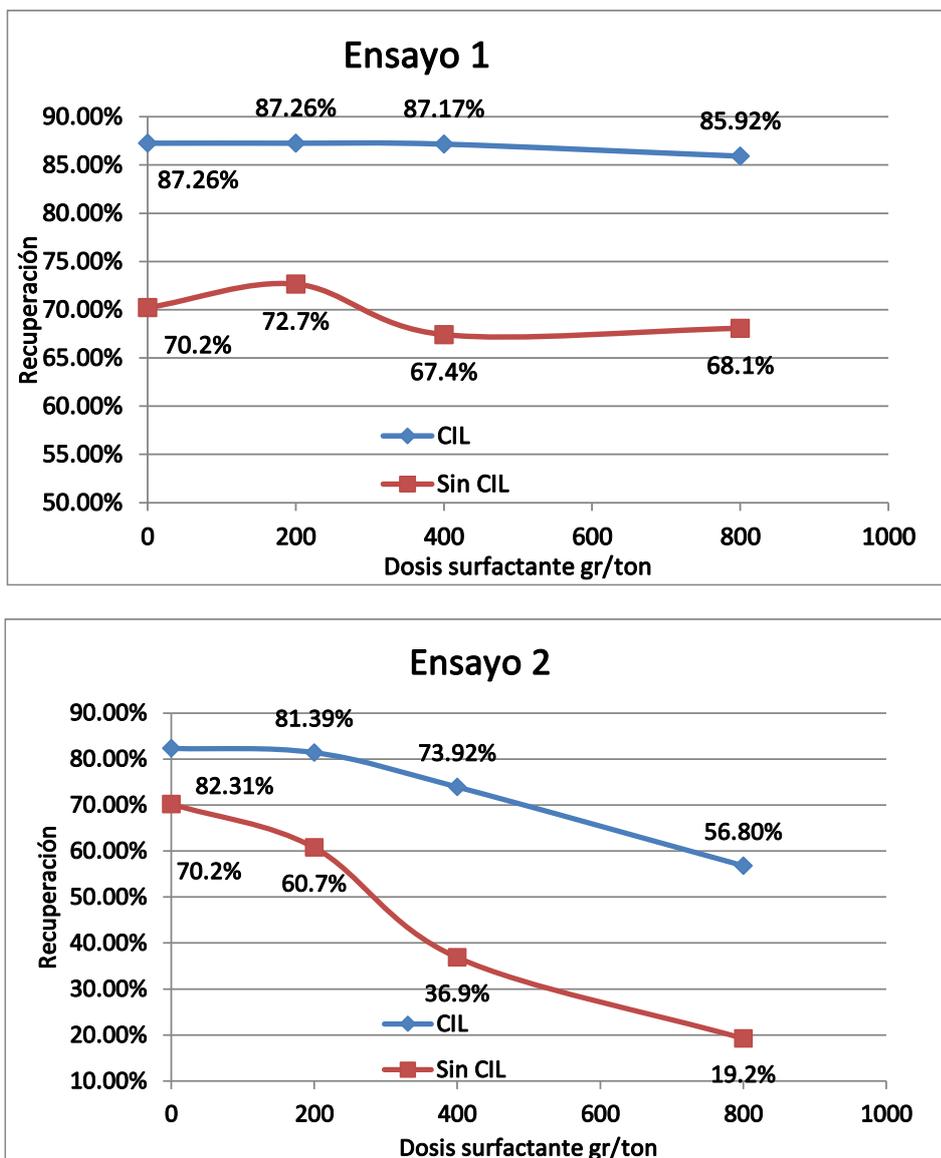


Figura 3.16: Comparación recuperaciones lixiviaciones con CIL y sin CIL a distintas concentraciones de surfactante para ensayo 1 y 2.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

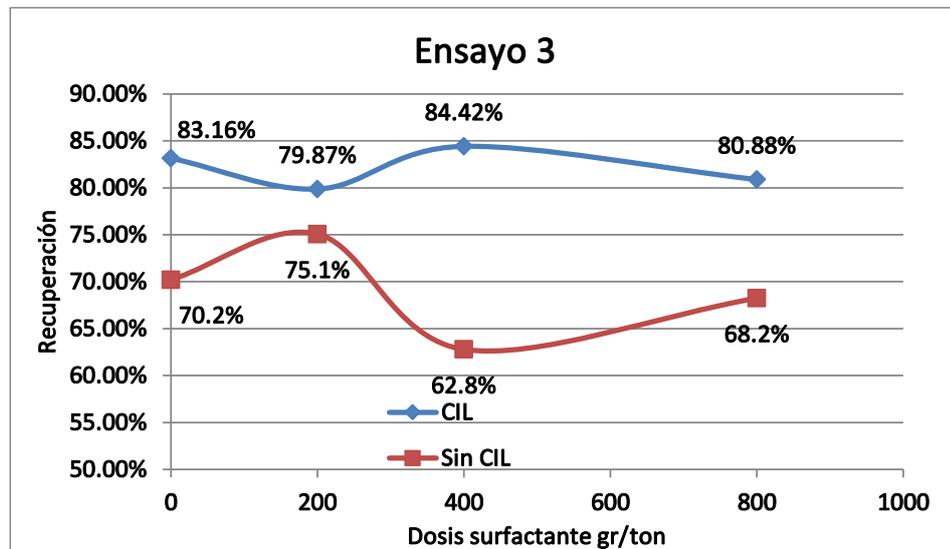


Figura 3.17: Comparación recuperaciones lixiviaciones con CIL y sin CIL a distintas concentraciones de surfactante para ensayo 3.

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Las recuperaciones obtenidas para el ensayo 1 mejoraron en un 25% promedio en todas las pruebas durante las 24 horas que duraron los ensayos. Para las pruebas del ensayo 2 se obtuvo una mejora del 26% para las dos primeras pruebas, mientras que en las últimas se obtuvo un incremento en la recuperación de 100% para la prueba con dosis surfactante de 400 g/ton y de 196% para la prueba con dosis de surfactante de 800 g/ton. Para las pruebas del ensayo 3 se tiene una mejora promedio de un 21% en la recuperación en todas las dosis de surfactante.

Al igual que en las pruebas realizadas en cada ensayo sin utilizar carbón, se puede observar que el surfactante utilizado no ayudó

en la recuperación e inclusive la perjudica. A mayor dosis de surfactante la recuperación baja para las lixiviaciones CIL.

Como se observó en las lixiviaciones sin carbón, el surfactante podría afectar realizando un recubrimiento a las partículas evitando su eficiente lixiviación. Al observar los resultados para cada prueba mostrados anteriormente, se puede observar que las absorciones de los carbones en cada prueba son muy buenas, disminuyendo despreciablemente al aumentar las dosis de surfactante.

El surfactante seleccionado no parece tener un efecto significativo en la absorción de los carbones, lo que se puede transmitir a la materia carbonosa la cual posee características de absorción similares.

Se han realizado una investigación acerca de la lixiviación de sulfuros en presencia de surfactantes, específicamente de la calcopirita. Sandoval et al. (P, L, & E, 1990), demostró que los surfactantes no iónicos tenían un efecto positivo en la velocidad de lixiviación de la calcopirita, mientras que los surfactantes

iónicos tenían un efecto negativo disminuyendo la lixiviación de este sulfuro.

Los surfactantes al ser sustancias que modifican la tensión de las interfases de dos superficies, afectan la lixiviación al recubrir la partícula de sulfuro, este recubrimiento hidrófobo con carga positiva característico de los surfactantes cationes interactúa de alguna manera con los iones cianuro cargados negativamente posiblemente pasivando la partícula y disminuyendo el ratio de lixiviación.

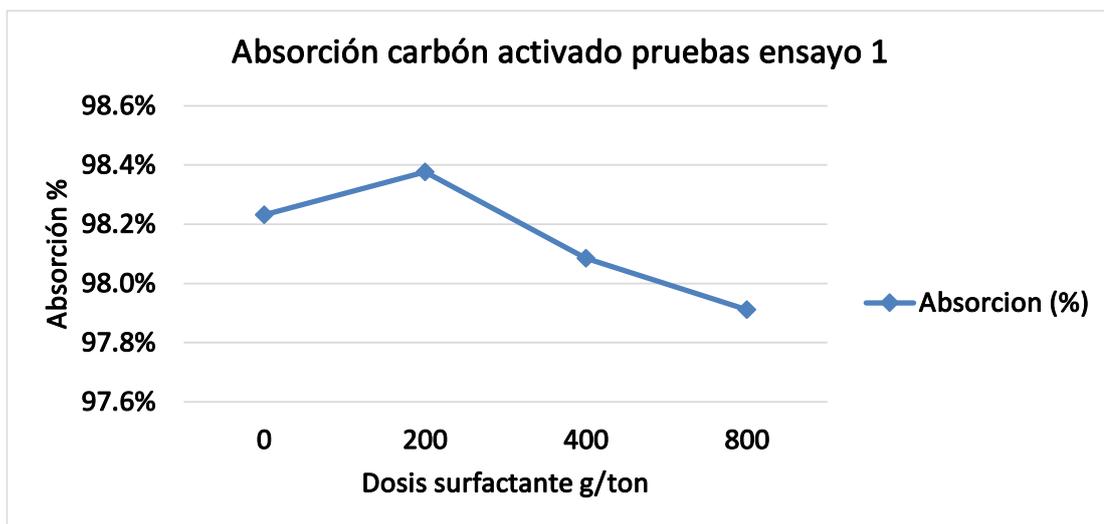


Figura 3.18: Absorción del carbón activado para cada prueba del ensayo 1.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

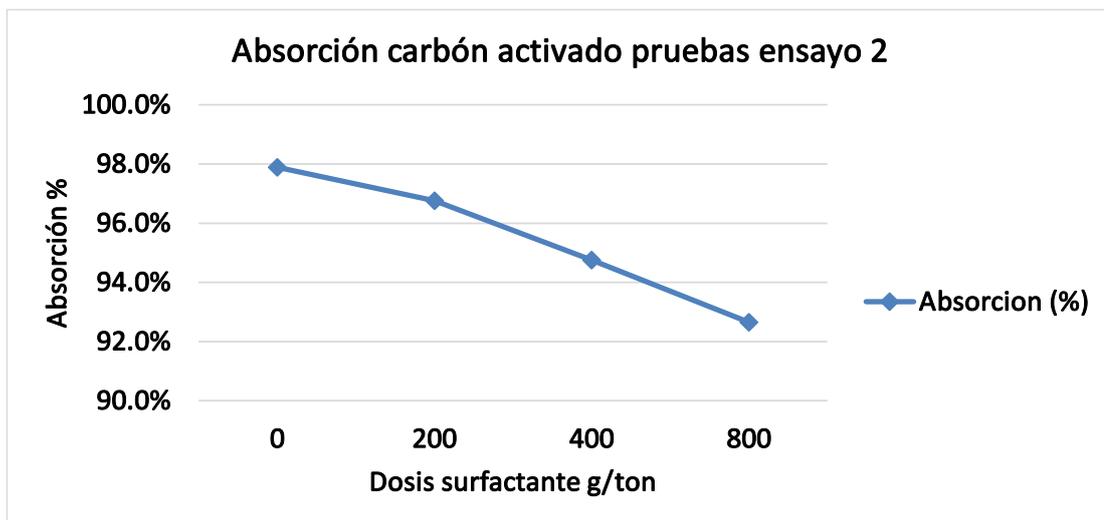


Figura 3.19: Absorción del carbón activado para cada prueba del ensayo 2.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

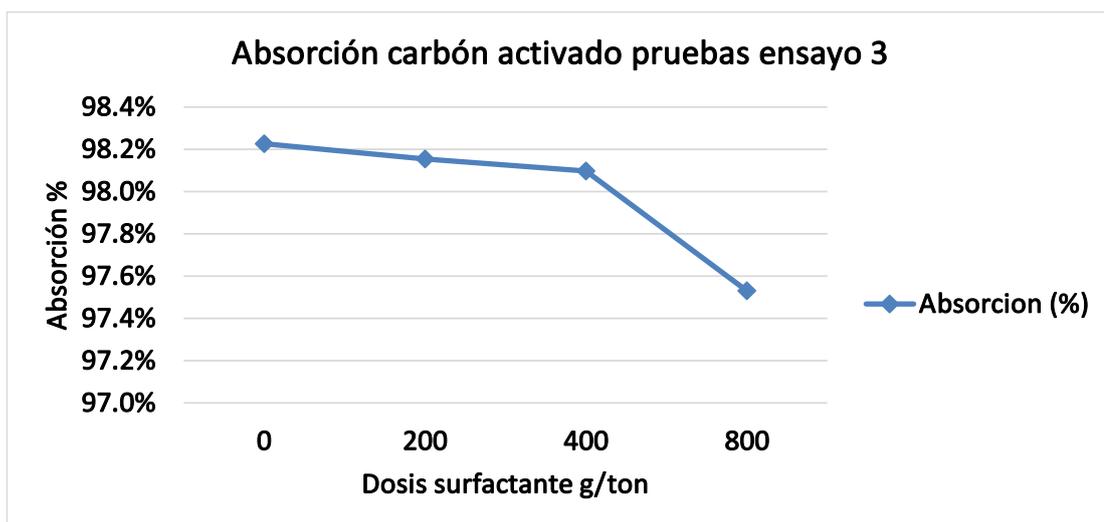


Figura 3.20: Absorción del carbón activado para cada prueba del ensayo 3.
Fuente: Valdivieso, P., 2017.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

El material responsable de preg-robbing está compuesto de aluminosilicatos y contenido de carbón bajo. Los ensayos petrográficos y el análisis de difracción de rayos X demostraron que la materia carbonosa se trata de una pizarra carbonosa o un esquisto grafitico.

La REX® ha demostrado ser un reactivo capaz de deprimir la materia carbonosa y disminuir el preg-robbing de 50% a 3.96%.

La REX® actúa de manera mucho más eficiente si se agrega en la etapa rougher en concentraciones de 1.81 kg/ton a 6.36 kg/ton. Entre mayores son las dosis de REX®, el preg-robbing disminuye de manera proporcional.

Si se agrega REX® en la etapa de cleaner adicional a la etapa rougher, mejora la recuperación en la lixiviación, obteniéndose una recuperación máxima de 87%

El pretratamiento con surfactante catiónico no ayudó a pasivar la materia carbonosa y mejorar la recuperación de las lixiviaciones en ambos casos (con CIL, sin CIL). Se observó que tuvo un impacto negativo ya que a mayores dosis de surfactante la recuperación en los ensayos de lixiviación disminuyó, así como la absorción de los carbones activados.

El uso de carbón en lixiviación (CIL) tuvo un resultado positivo en todos los ensayos realizados, aumentando la recuperación en promedio en 25%.

RECOMENDACIONES

Se recomienda en pruebas futuras utilizar REX® amarillo industrial. Este reactivo tiene todas las ventajas depresoras de materia carbonosa, y hay estudios que demuestran su gran eficacia como depresor.

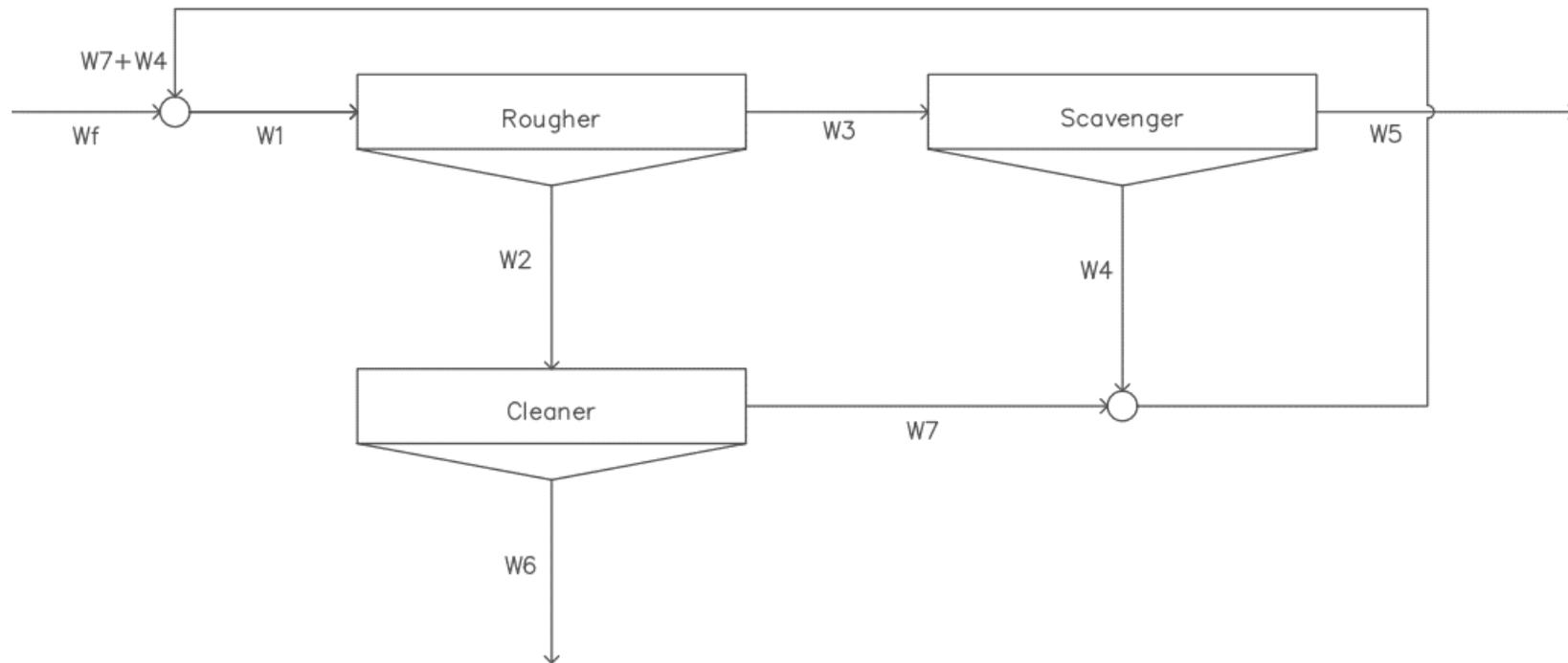
Se recomienda utilizar una granulometría 80% pasante malla 200 (75 μm) para tener buenos resultados en la lixiviación.

Se recomienda trabajar con una granulometría 80% pasante malla 60 (250 μm) para evitar la formación excesiva de lamas que pueda contaminar los concentrados de flotación.

ANEXOS

ANEXO A

MODELO MATEMÁTICO EMPLEADO PARA SIMULAR FLOTACIÓN INDUSTRIAL A PARTIR DE PRUEBAS DE LABORATORIO



Ecuación principal de balance de masas

$$W1 = Wf + W7 + W4$$

Cálculo de split factors de masas

- Split factor rougher SF1

$$SF1 = W2/W1$$

- Split factor cleaner SF2

$$SF2 = W6/W2$$

- Split factor scavenger SF3

$$SF2 = W3/W4$$

Formulación matemática masas

$$W2 = SF1 \times W1$$

$$W1 = W2 + W3$$

$$W3 = W1 - W2$$

$$W3 = W1 - SF1 \times W1$$

$$W3 = W1(1 - SF1)$$

$$W6 = SF2 \times W2$$

$$W6 = SF2 \times SF1 \times W1$$

$$W2 = W6 + W7$$

$$W7 = W2 - W6$$

$$W7 = SF1 \times W1 - SF2 \times SF1 \times W1$$

$$W7 = SF1 \times W1(1 - SF2)$$

$$W4 = SF3 \times W3$$

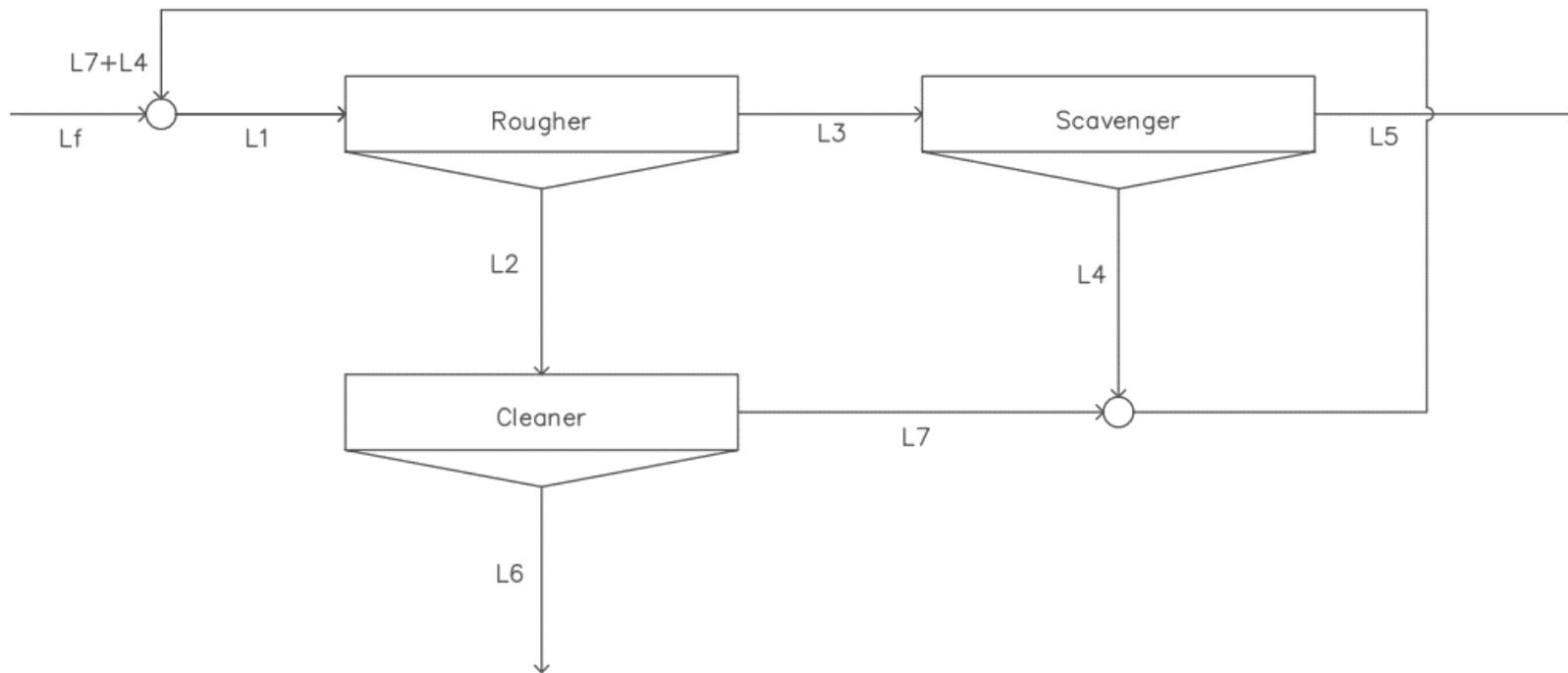
$$W4 = SF3 \times W1(1 - SF1)$$

$$W1 = Wf + SF1 \times W1(1 - SF2) + SF3 \times W1(1 - SF1)$$

$$Wf = W1 - SF1 \times W1(1 - SF2) - SF3 \times W1(1 - SF1)$$

$$Wf = W1(1 - SF1 \times (1 - SF2) - SF3 \times (1 - SF1))$$

$$W1 = \frac{Wf}{(1 - SF1 \times (1 - SF2) - SF3 \times (1 - SF1))}$$



Ecuación principal ley de oro

$$L1 = Lf + L7 + L4$$

Cálculo de split factors ley de oro

- Split factor rougher SFL1

$$SFL1 = L2/L1$$

- Split factor cleaner SFL2

$$SFL2 = L6/L2$$

- Split factor scavenger SFL3

$$SFL2 = L3/L4$$

Formulación matemática ley de oro

$$L2 = SFL1 \times L1$$

$$L1 = L2 + L3$$

$$L3 = L1 - L2$$

$$L3 = L1 - SF1 \times L1$$

$$L3 = L1(1 - SF1)$$

$$L6 = SF2 \times L2$$

$$L6 = SF2 \times SF1 \times L1$$

$$L2 = L6 + L7$$

$$L7 = L2 - L6$$

$$L7 = SFL1 \times L1 - SFL2 \times SFL1 \times L1$$

$$L7 = SFL1 \times L1(1 - SFL2)$$

$$L4 = SFL3 \times L3$$

$$L4 = SFL3 \times L1(1 - SFL1)$$

$$L1 = Lf + SFL1 \times L1(1 - SFL2) + SFL3 \times L1(1 - SFL1)$$

$$L_f = L_1 - SFL_1 \times L_1(1 - SFL_2) - SFL_3 \times L_1(1 - SFL_1)$$

$$L_f = L_1(1 - SFL_1 \times (1 - SFL_2) - SFL_3 \times (1 - SFL_1))$$

$$L_1 = \frac{L_f}{(1 - SFL_1 \times (1 - SFL_2) - SFL_3 \times (1 - SFL_1))}$$

Recuperación circuitos de flotación

$$R\% = \frac{SFL_1 \times SFL_2 \times L_1}{L_f} \times 100$$

Ratios de flotación

$$Ratios = \frac{SF_1 \times SF_2 \times W_1}{W_f}$$

ANEXO B

FÓRMULAS UTILIZADAS EN CÁLCULO DE CIANURACIÓN

Calculo de NaCN en solución

$$NaCN \text{ (ppm)} = \frac{V \text{ AgNO}_3 \text{ gasto ml} \times \text{Conc. AgNO}_3 \text{ (g/l)} \times 577}{V \text{ muestra ml}}$$

Calculo CN⁻ en solución

$$CN^- \text{ (ppm)} = \frac{NaCN \text{ (ppm)}}{1.884}$$

Porcentaje de extracción de oro

$$\% \text{ extracción} = \frac{\text{Dilución} \times \text{Au ensayado ppm}}{\text{Cabeza ensayada g/ton}}$$

Cabeza calculada

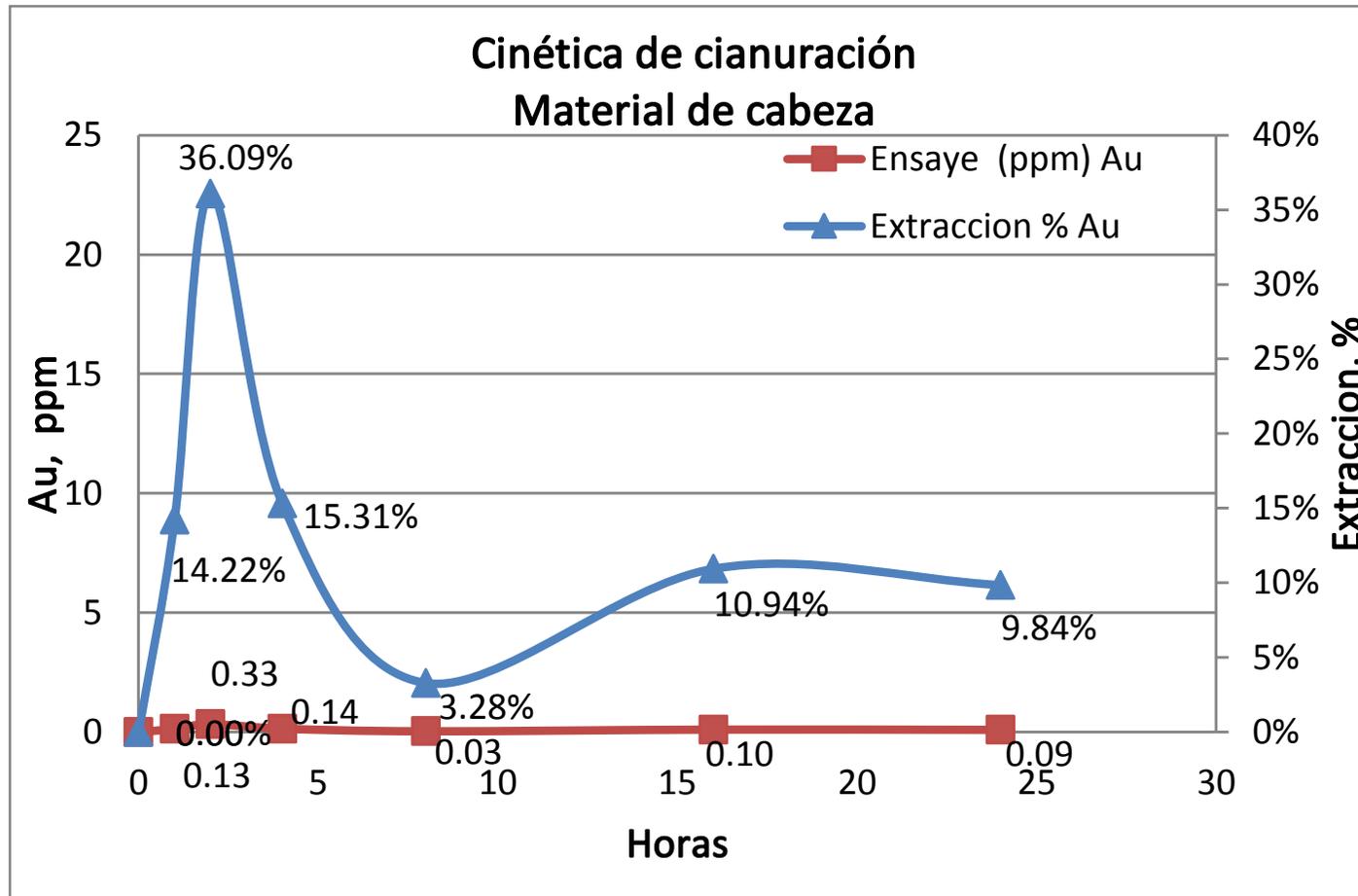
$$\text{Cabeza calculada} = (\text{última lectura Au ppm} \times 1.5) + \text{Residuo ensayado ppm}$$

Porcentaje de extracción final

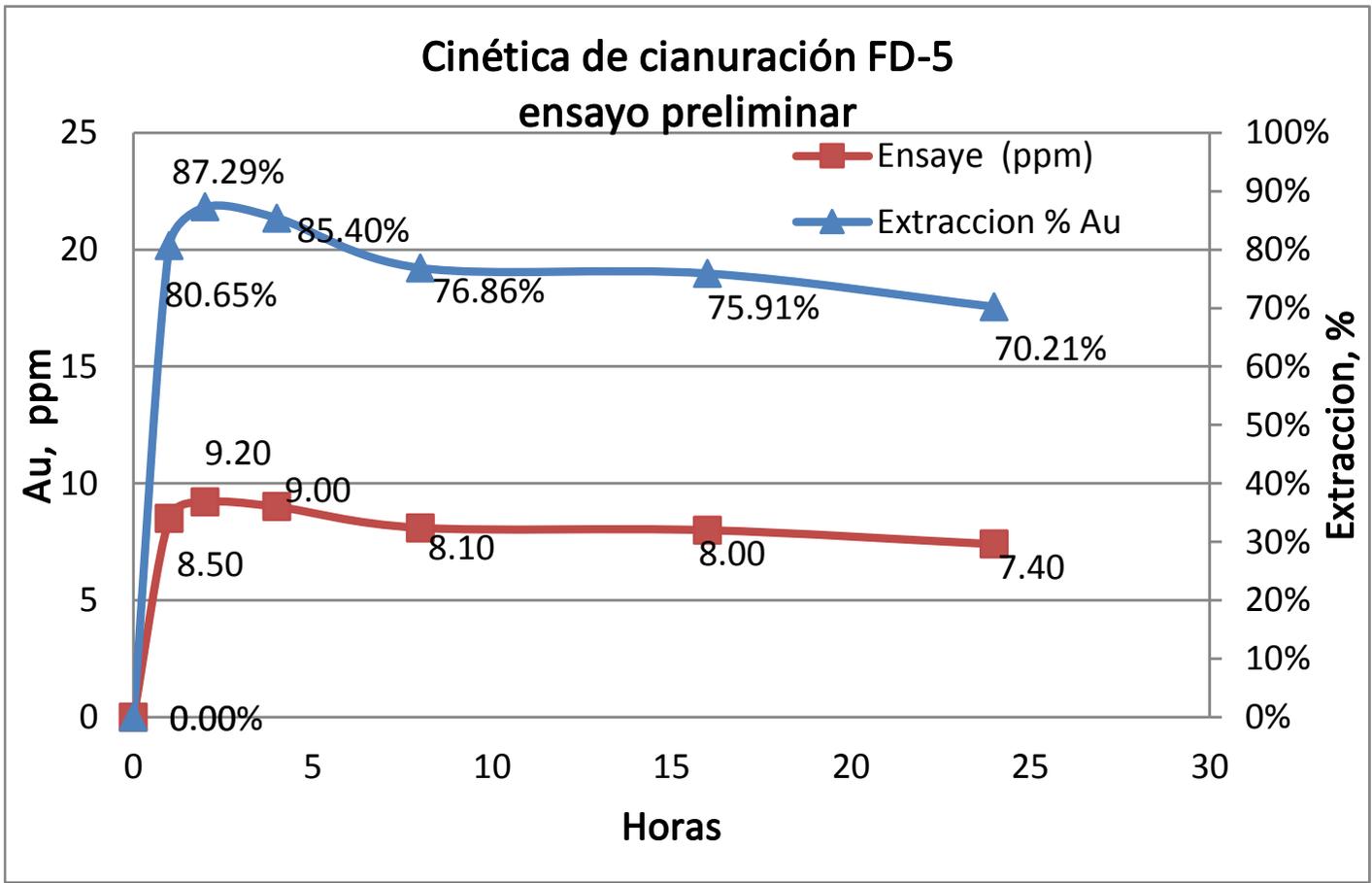
$$\text{Extracción final \%} = \left[1 - \left(\frac{\text{Residuo ensayado ppm}}{\text{Cabeza calculada ppm}} \right) \right] \times 10$$

ANEXO C

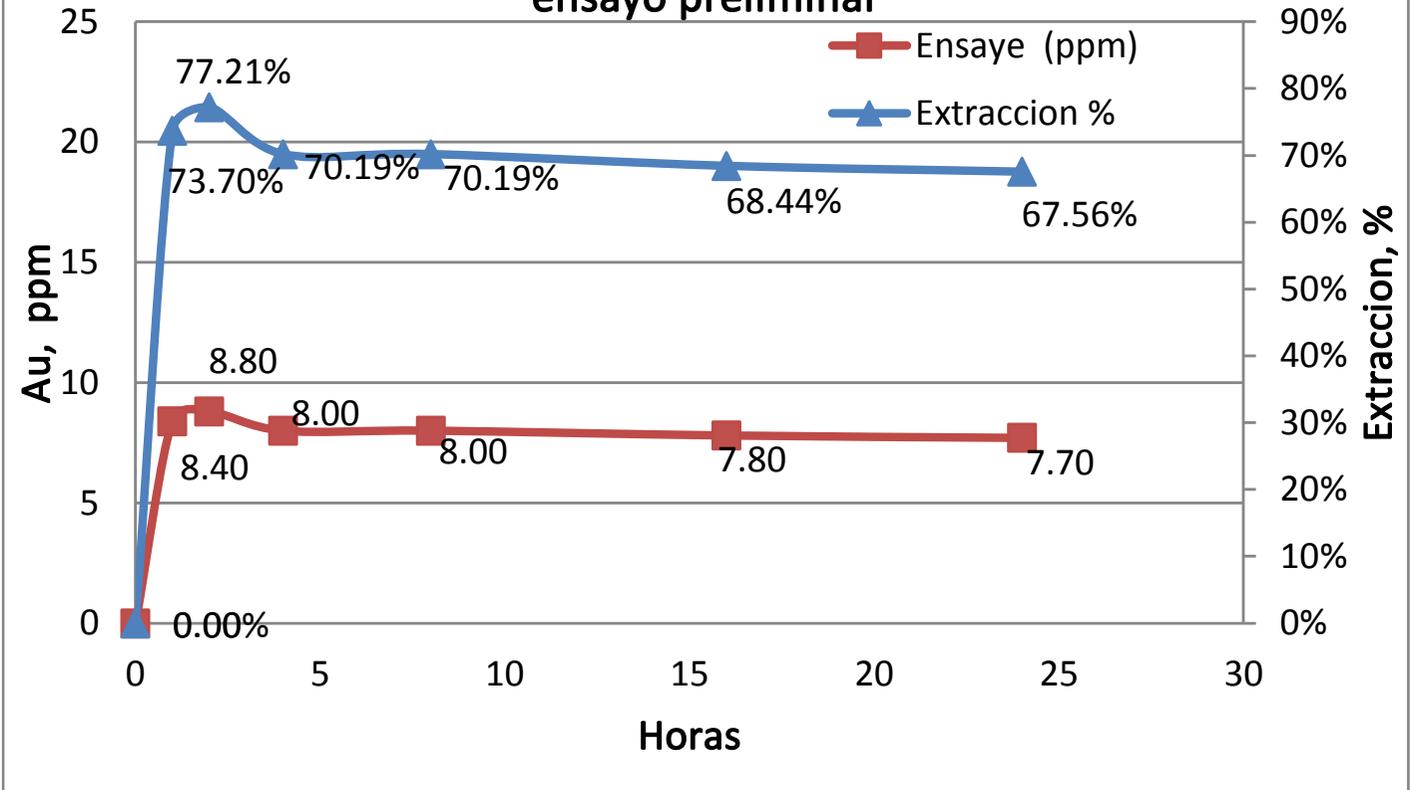
CINÉTICAS DE CIANURACIÓN DE ENSAYOS



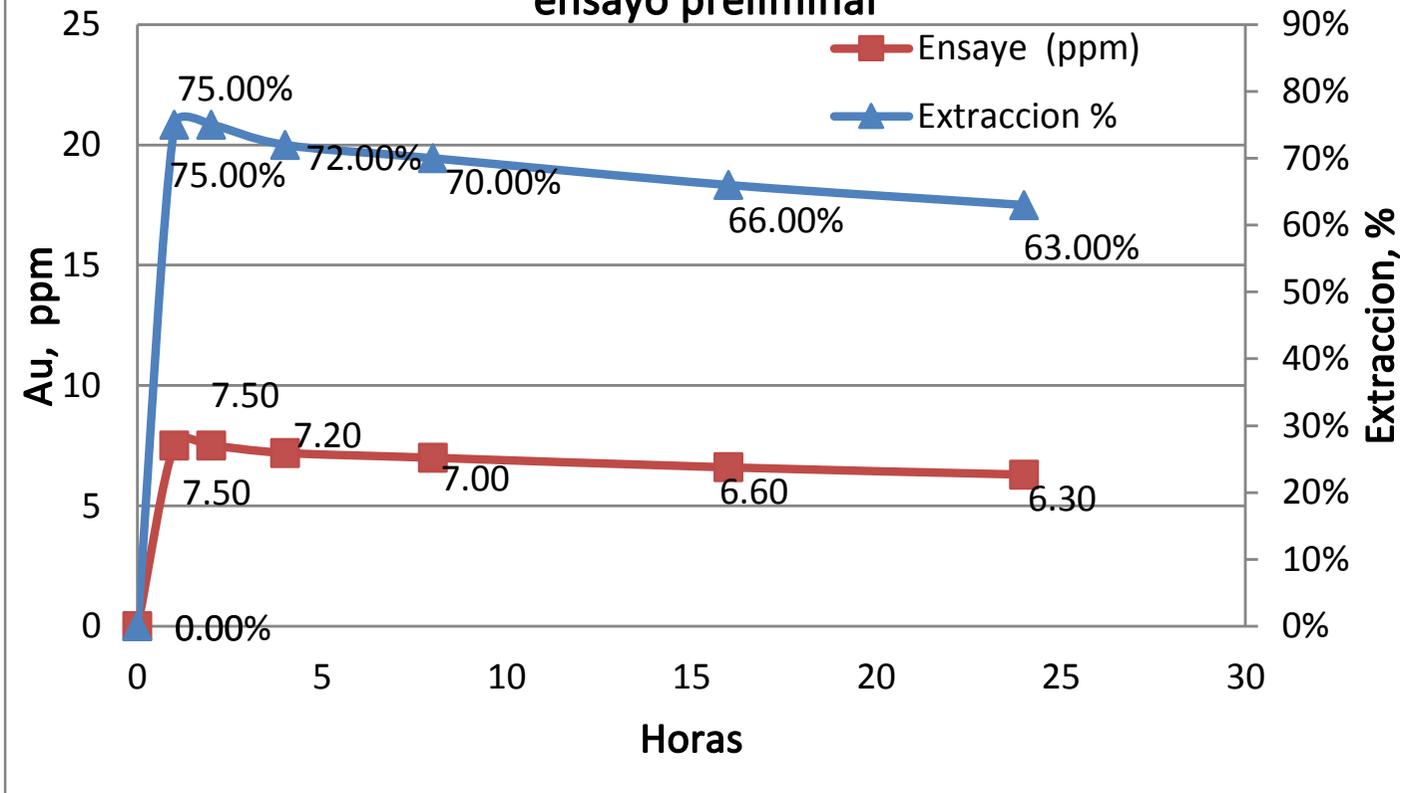
Cinética de cianuración FD-5 ensayo preliminar



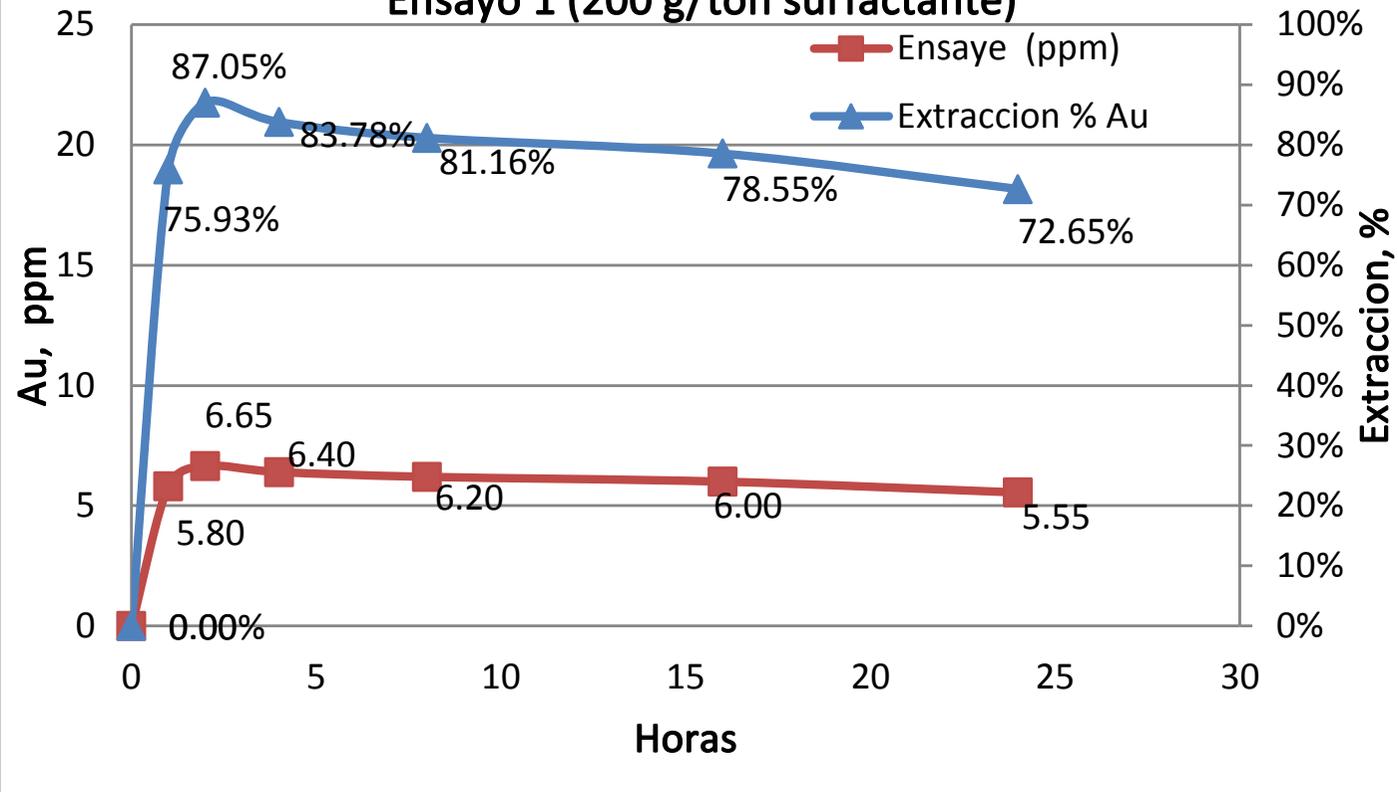
Cinética de cianuración FD-6 ensayo preliminar

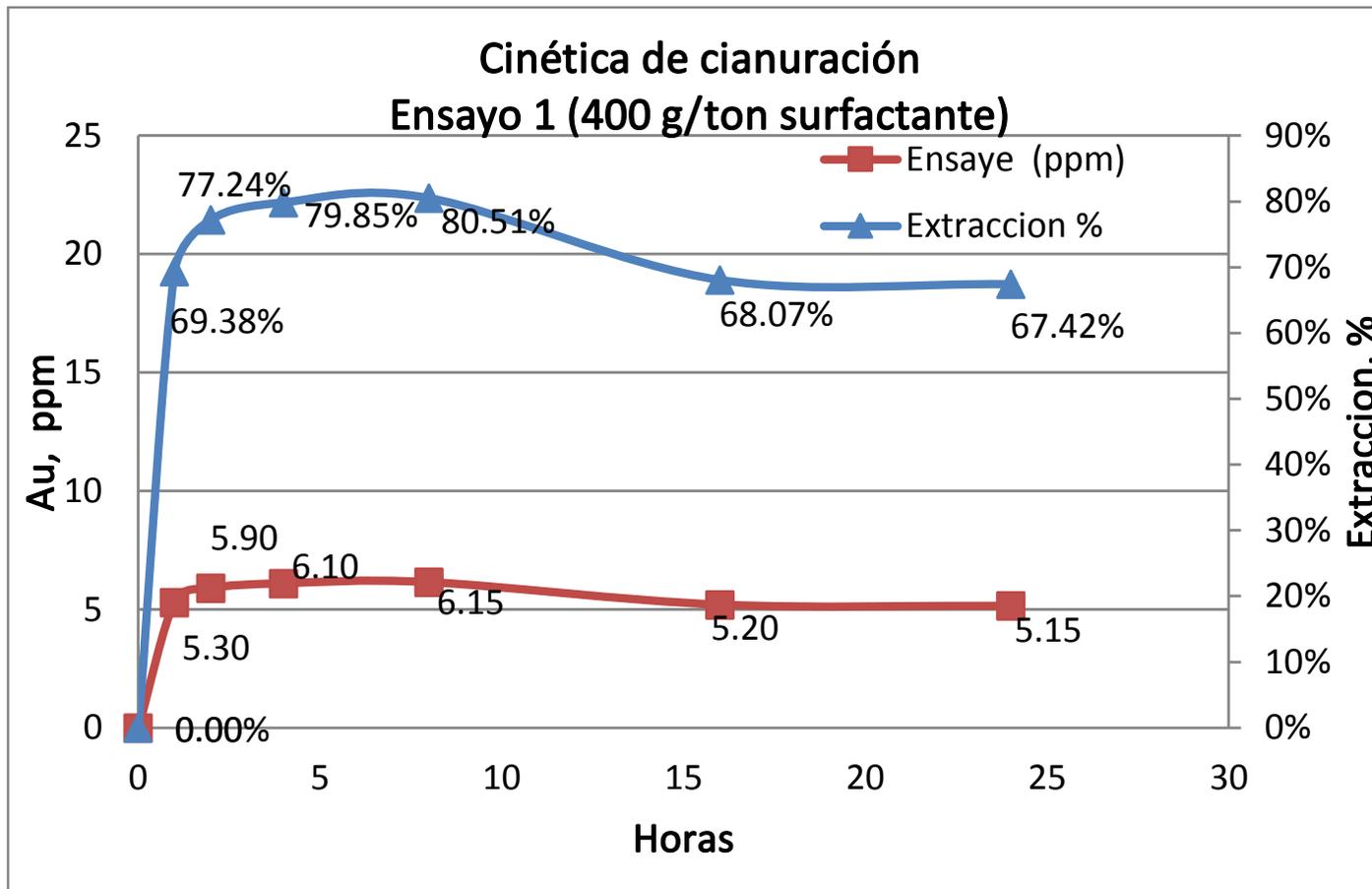


Cinética de cianuración FD-7 ensayo preliminar

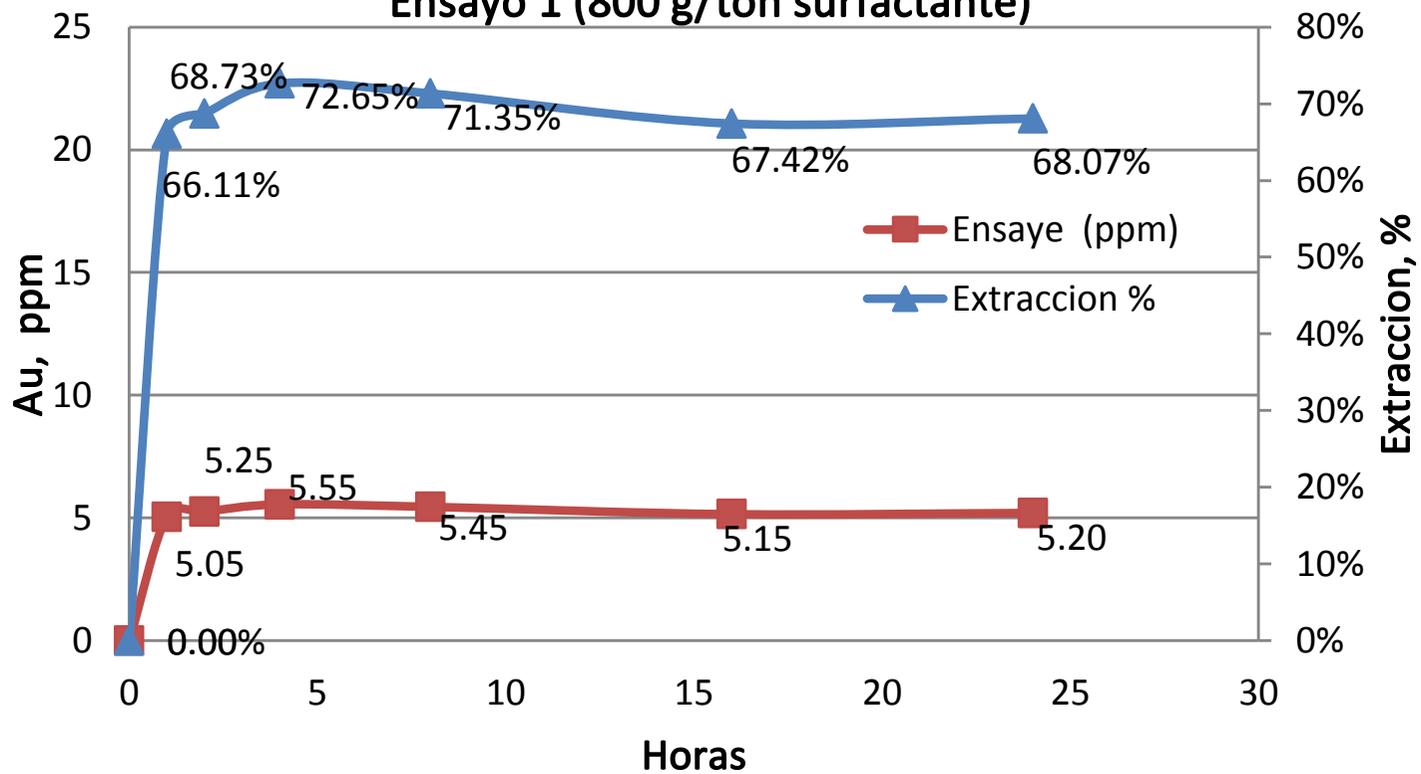


Cinética de cianuración Ensayo 1 (200 g/ton surfactante)

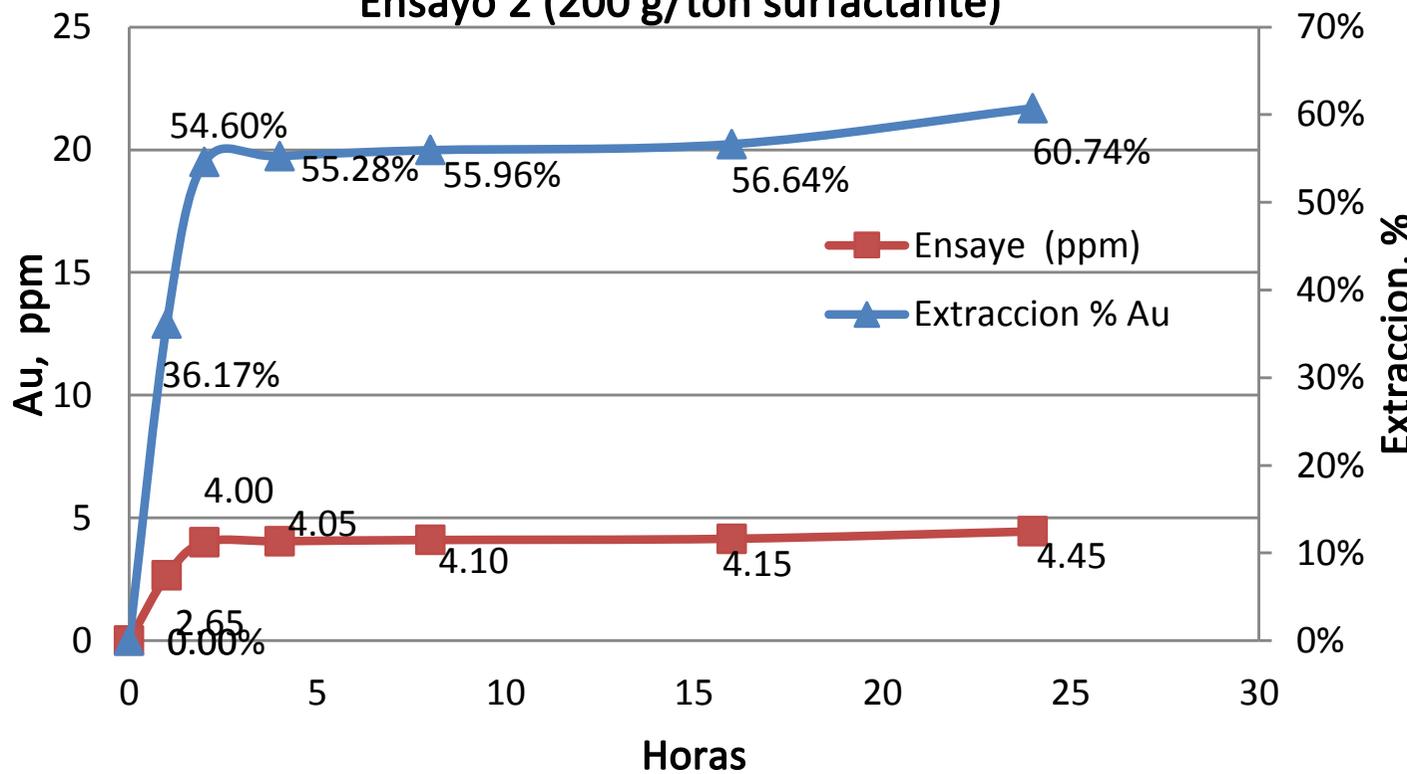




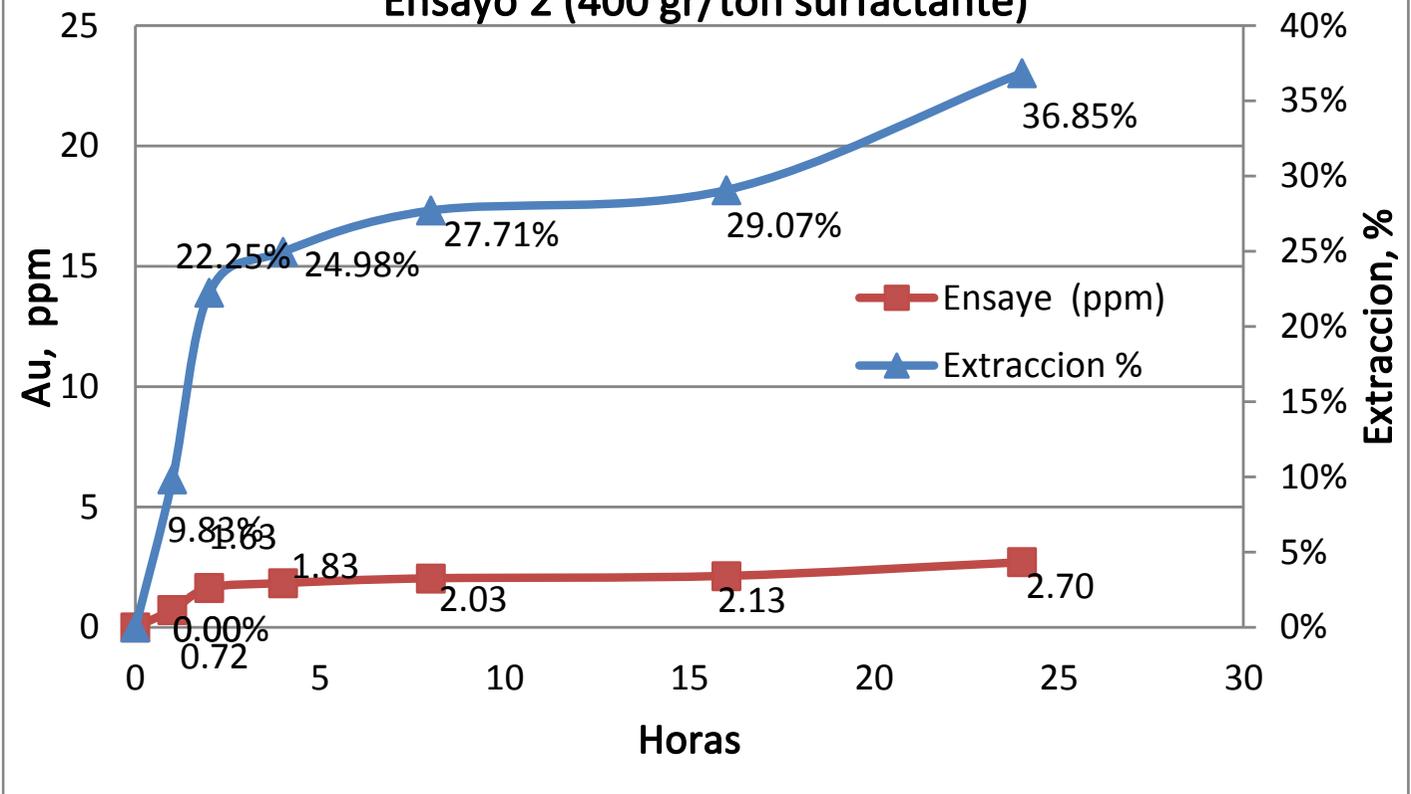
Cinética de cianuración Ensayo 1 (800 g/ton surfactante)



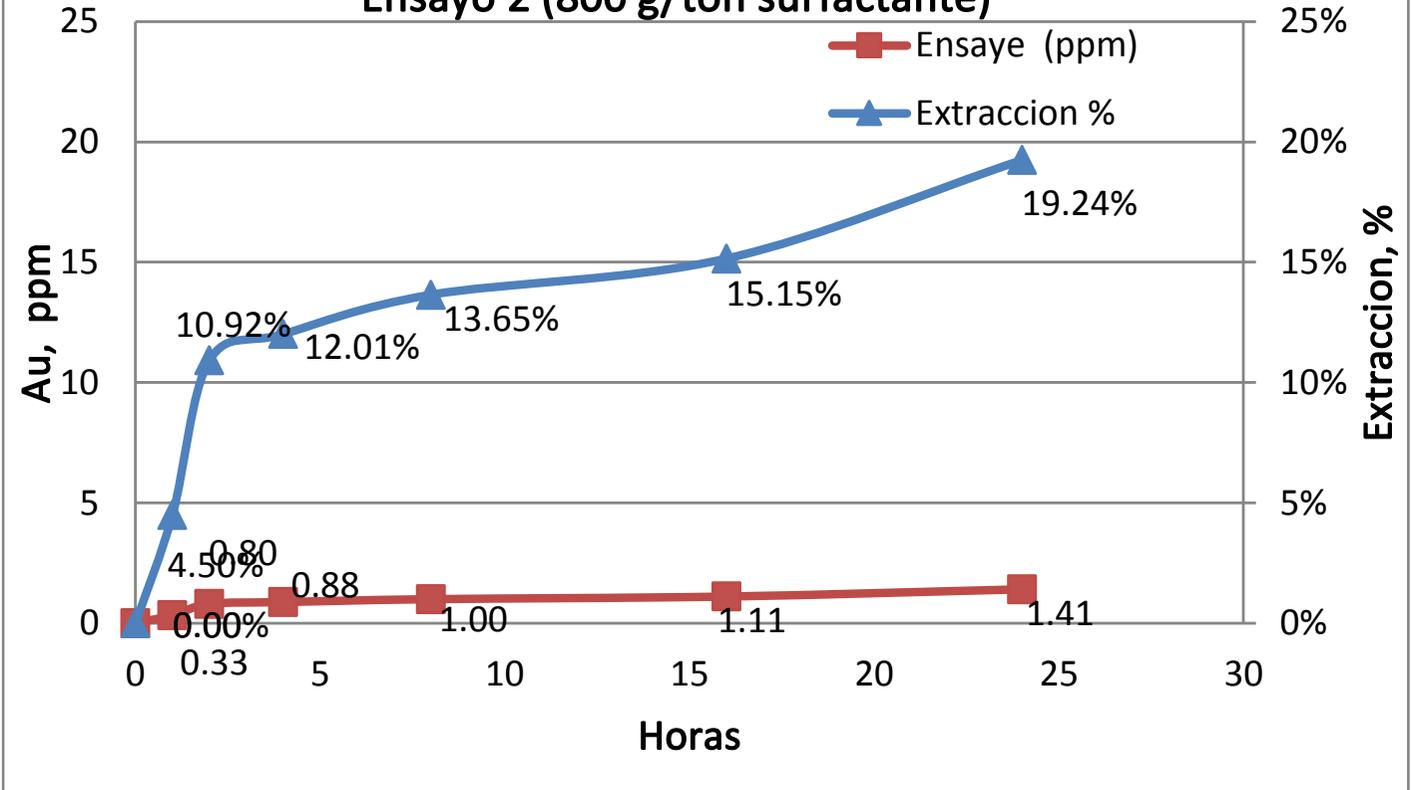
Cinética de cianuración Ensayo 2 (200 g/ton surfactante)



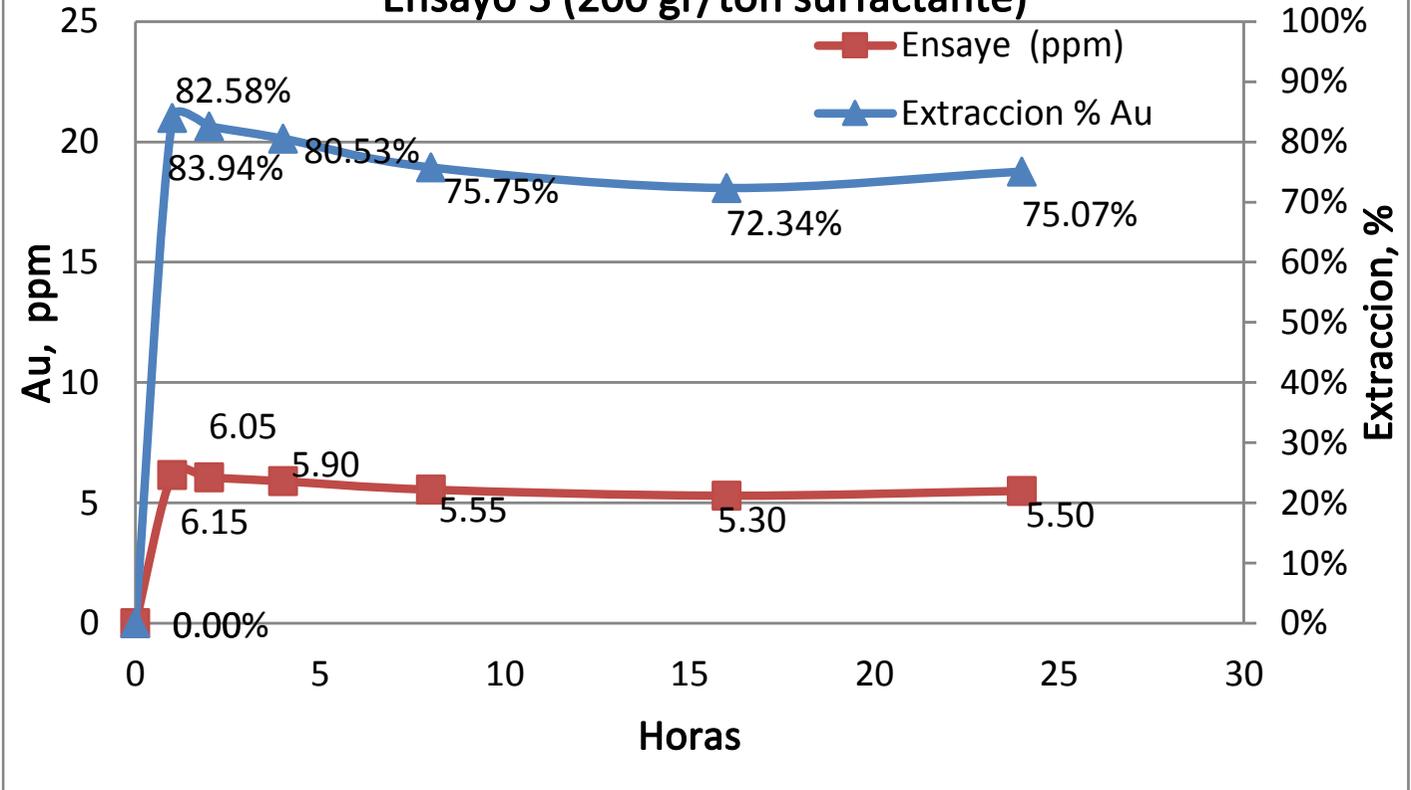
Cinética de cianuración Ensayo 2 (400 gr/ton surfactante)

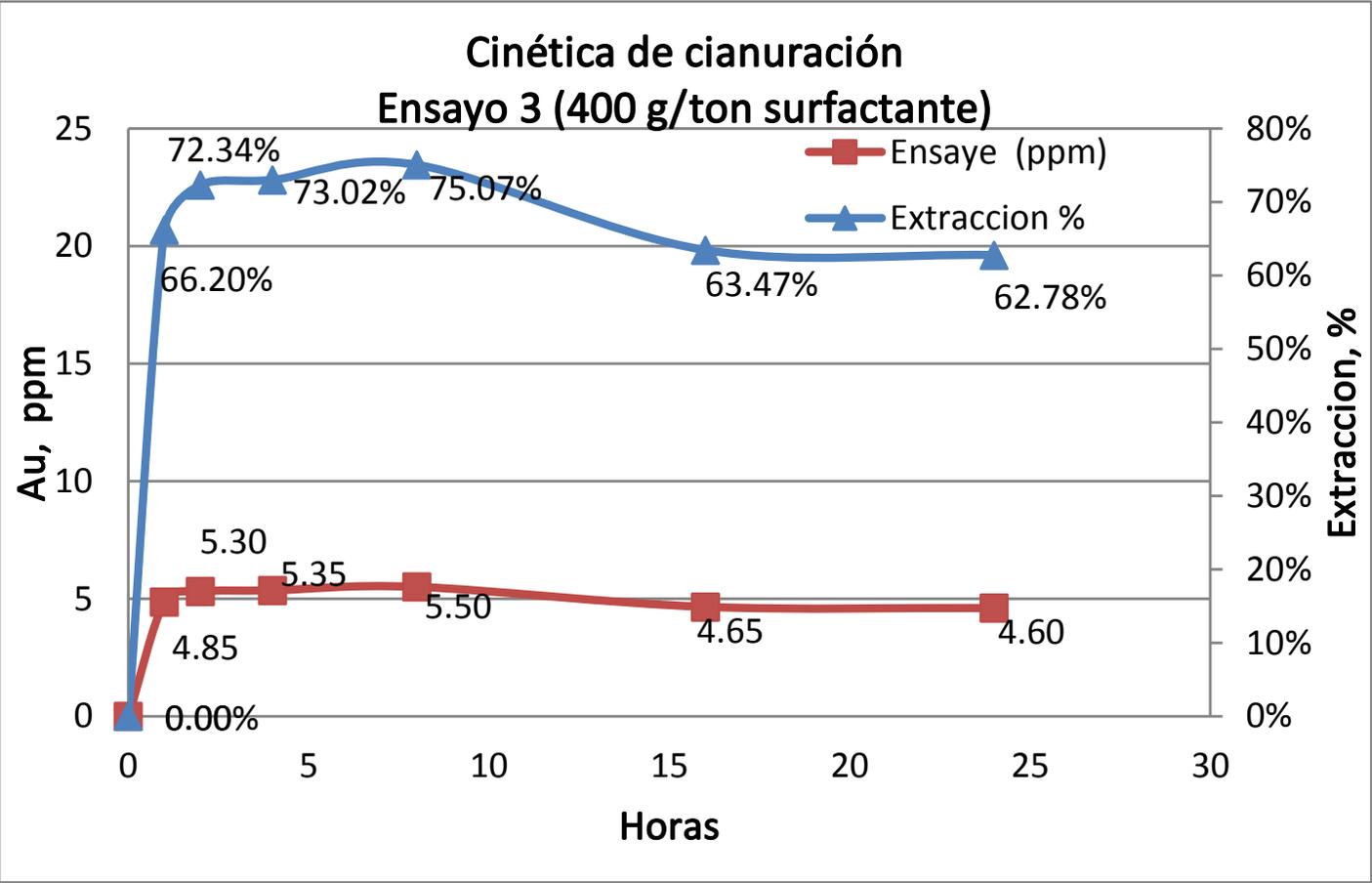


Cinética de cianuración Ensayo 2 (800 g/ton surfactante)

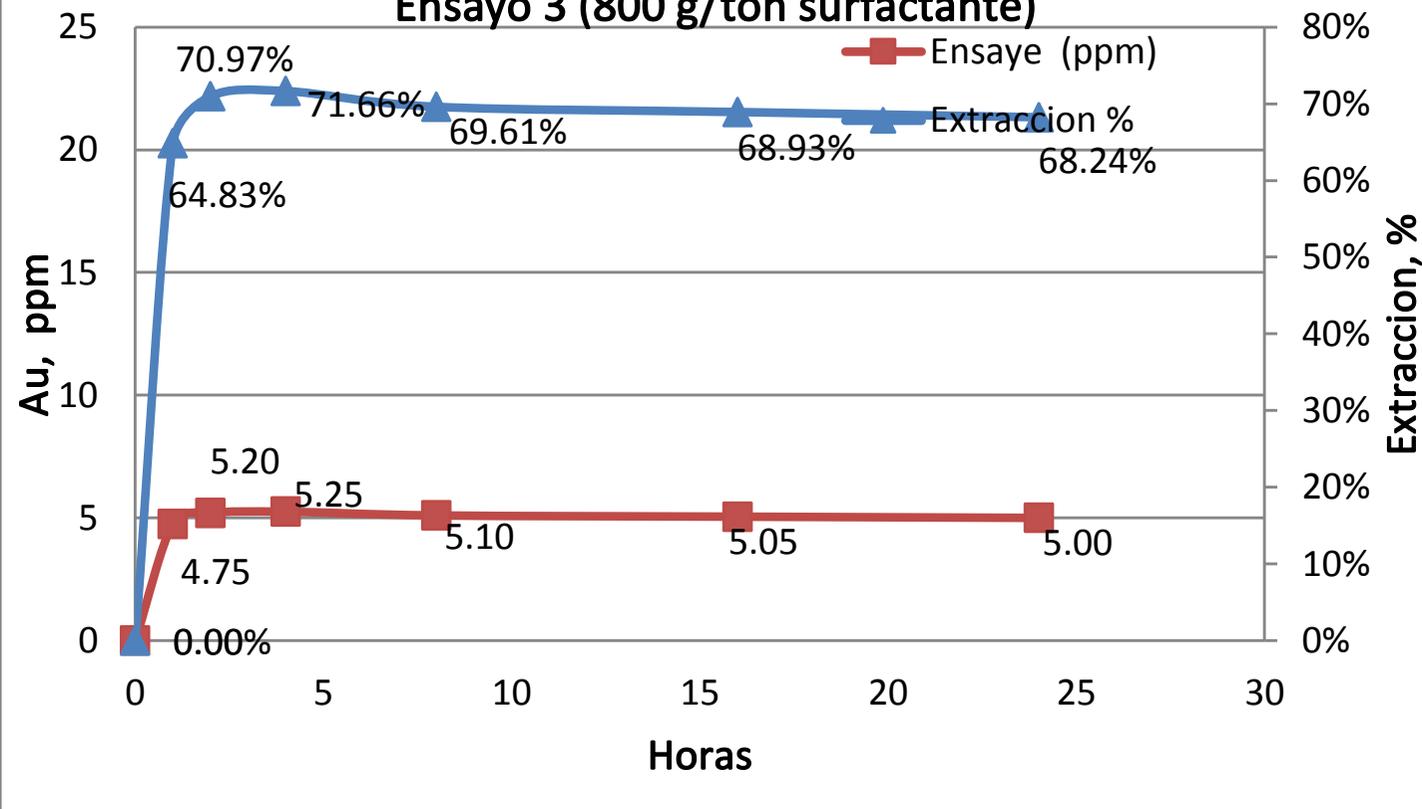


Cinética de cianuración Ensayo 3 (200 gr/ton surfactante)





Cinética de cianuración Ensayo 3 (800 g/ton surfactante)



BIBLIOGRAFÍA

Afenya, P. M. (1991). Treatment of carbonaceous refractory gold ores. *Minerals Engineering*, 4(7-11), 1043-1055.

Bulatovic, S. M. (2007). *Handbook of flotation reagents* (1 ed.). Amsterdam , Holanda , Paises bajos : Elsevier Science & Technology Books.

C, M., Fuerstenau, & Han, K. N. (2003). *Principles of mineral processing*. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

Duncan, D. W., Trussell, P. C., & Walden, C. C. (1964). Leaching of Chalcopyrite with *Thiobacillus ferrooxidans* : Effect of Surfactants and Shaking. *Applied microbiology*, 12(2), 122-126.

Dunne, R., Buda, K., Hill, M., Staunton, W., Wardell-Johnson, G., & Tjandrawan, V. (2012). Assessment of options for economic processing of preg-robbing gold ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 121(4), 217-223.

Gillot, J. (1968). *Clay in engineering geology*. Elviesier.

Goodall, W. R., Leatham, J. D., & Scales, P. J. (2005). A new method for determination of preg-robbing in gold ores. *Minerals Engineering*, 18, 1135-1141.

Guay, W. (1981). The treatment of refractory gold ores containing carbonaceous material and sulfides. *Society for Mining, Metallurgy & Exploration*, 30(2), 98-103.

Hong, H., & Ye, X. (1998). Study on characteristics of the gold in the lateritic gold mine. *Journal of Chinese Electron Microscope Society* , 1(17), 267-271.

Nieves Iglesias, F. C. (1994). Refractory gold-bearing ores: a review of treatment methods and recent advances in biotechnological techniques. *Hydrometallurgy*, 34(3), 383-395. doi:10.1016/0304-386X(94)90074-4

Ofori-Sarpong, G., Tien, M., & Osseo-Asare, K. (2010). Myco-hydrometallurgy: Coal model for potential reduction of preg-robbing capacity of carbonaceous gold ores using the fungus, *Phanerochaete chrysosporium*. *Hydrometallurgy*, 102(1-4), 66-72.

P, S. S., L, P. D., & E, S. L. (1990). Effect of nonionic surfactants on chalcopryrite leaching under dump chemical conditions. Spokane: Bureau of mines.

Parga, J. R., & Carillo, F. R. (1996). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios. *Revista de Metalúrgia*, 32(c), 254-261. doi:10.3989/revmetalm.1996.v32.i4.907

Pyke, B. L., Johnston, R. F., & Brooks, P. (1999). Characterisation and behaviour of carbonaceous material in a refractory gold bearing ore. *Minerals Engineering*, 12(8), 851-862.

Tan, H., Feng, D., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2005). The behaviour of carbonaceous matter in cyanide leaching of gold. *Hydrometallurgy*, 78(3-4), 226-235.

Tremolada, J., Dzioba, R., Bernardo-sánchez, A., & Menéndez-aguado, J. M. (2010). The preg-robbing of gold and silver by clays during cyanidation under agitation and heap leaching conditions. *International Journal of Mineral Processing*, 94(1-2), 67-71.

Yang, H. Y., Liu, Q., Song, X. L., & Dong, J. K. (2013). Research status of carbonaceous matter in carbonaceous gold ores and bio-oxidation pretreatment. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 23(11), 3405-3411.

Zhou, Q., Zachwieja, J., Lima, O., Green, B., Murray, M., Verhoeven, J., & Jiang, J. (2015). Surfactant blinding agents for refractory carbonaceous gold ores in cyanide leaching. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, (págs. 1-9). Poços de Caldas.

Zhou, Z., & Gunter, W. (1992). The nature of the surface charge of kaolinite. *Clays and Clay Minerals* , 1(40), 355-361.