

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

EVALUACIÓN DE LIXIVIACIÓN INTENSIVA EN UN
REACTOR ILR-150 GEKKO DE CONCENTRADO
DE ORO DE LA ZONA SAN SIMÓN-BOLIVIA

TESIS

Presentada por:

Bach. Carlos Enrique Juárez Ticona

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA - PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DE LIXIVIACIÓN INTENSIVA EN UN
REACTOR ILR-150 GEKKO DE CONCENTRADO DE
ORO DE LA ZONA SAN SIMÓN-BOLIVIA**

TESIS

Tesis sustentada por el Bachiller CARLOS ENRIQUE JUÁREZ TICONA, aprobado el día 12 de diciembre de 2018, siendo el Jurado Calificador integrado por:


PRESIDENTE


.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez


SECRETARIO


.....
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

VOCAL


.....
Msc. Matías Carlos Vivar Colquicocha

ASESOR


.....
Ing. Daniel Jesús Zevallos Ramos

DEDICATORIA

Con el amor más grande, más puro y consejos, dedico el presente trabajo a mis padres Carlos y Severina; a mis hermanas Karla y Carmen, por brindarme su apoyo para ser un buen profesional y hombre de bien para el futuro.

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, quienes con su apoyo incondicional fueron guiando mis pasos para convertirme en profesional. Mi profundo agradecimiento a mi padre, madre y hermanas por su apoyo y el interés que siempre pusieron para lograr concluir mi meta como profesional, igualmente, a todas las personas, que de una forma u otra apoyaron en la culminación de mi proyecto de investigación.

CONTENIDO

	Página
CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xiii
INTRODUCCIÓN	01
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	03
1.1. Descripción del problema	03
1.1.1. Antecedentes del problema	03
1.1.2. Problemática de la investigación	04
1.2. Formulación del problema	05
1.3. Justificación e importancia	06
1.4. Alcances y limitaciones	07
1.5. Objetivos	07
1.5.1. Objetivo general	07

1.5.2. Objetivos específicos	07
1.6. Hipótesis	08
1.6.1. Hipótesis general	08
1.6.2. Hipótesis específica	08
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	09
2.1. Antecedentes	09
2.2. Lixiviación	10
2.3. Tipos de lixiviación	13
2.3.1. Lixiviación por agitación	13
2.3.2. Lixiviación en pila	15
2.3.3. Cianuración intensiva	16
2.3.3.1. Fundamentos de operación	17
2.3.3.2. Descripción del equipo	18
2.3.3.3. Ciclos del modelo Batch Gekko ILR-150	20
2.4. Gravimetría de minerales auríferos	21
2.4.1. Introducción	21
2.4.2. Fundamentos de la gravimetría	25

2.5. Concentración por flotación	26
2.5.1. Factores que influyen en la flotación de oro	27
2.6. Concentración centrífuga	29
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	32
3.1. Tipo y diseño de la investigación	32
3.2. Población y muestra	32
3.3. Caracterización del concentrado	33
3.4. Toma de muestras	36
3.5. Propiedades físicas y químicas	37
3.5.1. Propiedades físicas	37
3.5.2. Propiedades químicas	37
3.6. Operacionalización de variables	38
3.7. Dosificación de reactivos	38
3.8. Costos estimados	39
3.9. Materiales	39
3.10. Equipo	40
3.11. Instrumentos	40

3.12. Operación del reactor de lixiviación en línea-modelo	
batch IRL-150 Gekko	40
3.13. Ciclos del modelo batch-Gekko IRL 150	43
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1. Resultados	44
4.2. Recuperación de la etapa de electrodeposición	51
4.3. Consumo de cianuro	53
4.4. Consumo de oxígeno	54
4.5. Determinación del costo de procesamiento	55
4.6. Ventajas específicas del reactor Gekko–batch	56
CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXOS	62

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Partes principales del reactor Gekko	17
Tabla 2. Análisis granulométrico del del concentrado	37
Tabla 3. Contenido de oro en concentrados gravimétricos	38
Tabla 4. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, B-16	44
Tabla 5. Balance en cianuración de oro en 8 horas en lixiviación intensiva, prueba B-16	45
Tabla 6. Ley en sólidos a diferentes tiempos de lixiviación intensiva, prueba B-16	45
Tabla 7. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, B-17	46
Tabla 8. Balance en cianuración de oro en 8 horas en lixiviación intensiva, prueba B-17	46
Tabla 9. Ley en sólidos a diferentes tiempos de lixiviación intensiva, prueba B-17	47
Tabla 10. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, B-18	47
Tabla 11. Balance en cianuración de oro en 8 horas	

en lixiviación intensiva, prueba B-18	48
Tabla 12. Ley en sólidos a diferentes tiempos de lixiviación intensiva, prueba B-18	48
Tabla 13. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, B-19	48
Tabla 14. Balance en cianuración de oro en 8 horas en lixiviación intensiva, prueba B-19	49
Tabla 15. Ley en sólidos a diferentes tiempos de lixiviación intensiva, prueba B-19	49
Tabla 16. Recuperación de oro en sólidos y líquidos	50
Tabla 17. Balance metalúrgico en la etapa de electro-obtención, prueba B-16	51
Tabla 18. Balance metalúrgico en la etapa de electro-obtención, prueba B-16	51
Tabla 19. Balance metalúrgico en la etapa de electro-obtención, prueba B-18	52
Tabla 20. Balance metalúrgico en la etapa de electro-obtención, prueba B-19.	52
Tabla 21. Recuperación del proceso de electrodeposición de oro	53
Tabla 22. Consumo de cianuro	54
Tabla 23. Costo de lixiviación IRL-150 Gekko	55

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Principio de lixiviación en tambor	18
Figura 2. Características típicas del Gekko Batch ILR	19
Figura 3. Flowsheet sistema batch Gekko ILR 150	21
Figura 4. Asociación de oro en minerales sulfurosos	23
Figura 5. Ubicación de la planta metalúrgica en la provincia Iténez del Beni	34
Figura 6. Bocamina abierta por Eaglecrest en el cerro de San Simón, año 2010	35
Figura 7. Concentradores gravimétricos ICON	36
Figura 8. Sistema de mezclado IRL Gekko	41
Figura 9. Ciclo de lixiviación intensiva IRL Gekko	42
Figura 10. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-16	45
Figura 11. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-17	46
Figura 12. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-18	47
Figura 13. Recuperación de oro a diferentes tiempos de	

lixiviación, prueba B-19	49
Figura 14. Recuperación en el equipo Gekko	50
Figura 15. Recuperación del proceso de electrodeposición	52
Figura 16. Vista de planta minera Eaglecrest	62
Figura 17. Vista de planta de circuitos gravimétricos y de flotación	62
Figura 18. Disposición de banco de concentradores gravimétricos	
ICON	63
Figura 19. Disposición de banco de celdas de flotación	64
Figura 20. Disposición de tanques de agua y cianuro	65
Figura 21. Disposición de tanques de oxígeno	65
Figura 22. Conexiones y controles en la entrada del equipo Gekko	66
Figura 23. Entrada de oxígeno y pulpa al equipo Gekko proveniente	
de concentradores gravimétricos	67
Figura 24. Entrada de agua al tambor del equipo Gekko	67
Figura 25. Tambor de equipo Gekko	68
Figura 26. Vista frontal del tambor de equipo Gekko	68
Figura 27. Vista frontal de la tolva de alimentación al ingreso del	
equipo Gekko	69
Figura 28. Vista frontal del panel view del equipo Gekko	70
Figura 29. Vista frontal del tablero de control del equipo Gekko	70
Figura 30. Fuente de poder de la celda de electrodeposición	71
Figura 31. Celda de electrodeposición de oro	71

Figura 32. Disposición de cátodos y ánodos en celda de electrodeposición de oro	72
Figura 33. Cosecha de cátodos de oro	72
Figura 34. Horno de fusión de oro	73
Figura 35. Obtención de lingote de oro	73
Figura 36. Peso obtenido de lingote de oro	74
Figura 37. Obtención de oro refinado	74

RESUMEN

En el presente estudio se evalúa el proceso de lixiviación de concentrados de oro en un reactor ILR - 150 Gekko, siendo el objetivo principal mejorar el proceso de beneficio de los concentrados auríferos y determinar la eficiencia de extracción del oro mediante la técnica de lixiviación intensiva de los concentrados auríferos que se generan en las diferentes plantas de tratamiento de oro.

Se realizaron diferentes pruebas aplicando lixiviación intensiva en un reactor ILR – 150 Gekko a concentrados de oro con tenores de 200 g/t hasta los 500 g/t de oro, manteniendo una concentración de 2 % en cianuro, y una concentración de oxígeno disuelto en solución de 20 ppm, por un tiempo de proceso de 8 horas de lixiviación, 2 horas en la etapa de lavado del mineral y 12 horas de recuperación de oro desde las soluciones cargadas por medio de una electrólisis directa.

Se determinó que aplicando este tipo de proceso se llega a obtener una recuperación promedio del 97 %, siendo 98,8 % la recuperación más alta, aplicada a un concentrado de 247 g/t de oro.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la empresa “EAGLECREST EXPLORATION BOLIVIA”, viene operando en la zona de San Simón, desde la etapa de minería subterránea, con una capacidad de explotación de 140 t/d con una ley promedio de 5 a 8 g/t, esta carga es transportada a la planta concentradora, la cual está compuesta por un circuito de chancado primario, secundario, clasificación en seco, molienda, clasificación húmeda, concentración gravimétrica y flotación; la planta de concentración tiene una capacidad de tratamiento de 180 a 200 t/d, lo que se hace en planta es mezclar la carga fresca de mina con arenas de baja ley para obtener un mineral con un promedio de 3,5 a 4 g/t, la eficiencia global de la planta en sus dos circuitos es de 78 a 80 %.

El circuito de gravimetría está compuesta por 4 centrifugas tipo “Falcón” desde donde se obtiene 2 toneladas de concentrado con una ley de 350 a 500 g/t y 2 toneladas de pre-concentrado con una ley de 200 a 300 g/t en oro. Además se tiene implementado un circuito de flotación, donde se obtiene entre 3 a 4 t/d, con una ley promedio de 65 a 100 g/t.

Al iniciar las operaciones en la planta de lixiviación intensiva de concentrados, los concentrados gravimétricos eran procesados y los concentrados de flotación eran enviados a la venta. La planta cuenta con un equipo IRL-150 Gekko, con capacidad de llegar a eficiencias del 98% de extracción de oro, en un tiempo de proceso de 6 a 8 horas, siendo sus variables operativas más significativas la concentración de cianuro $[\text{CN}^-] = 2 \%$, y una mezcla de aire a presión enriquecido con oxígeno, este equipo es compacto en su sistema y obtiene una solución clarificada que puede ser trasladada hacia la línea de electrodeposición directa, debido a que la concentración de oro en la solución suele estar en el rango de 45 a 120 mg/ℓ.

Complementando el reactor de lixiviación intensiva Gekko, se cuenta con el área de tanque para manejo de solución (agua de Lavado, agua de proceso, agua fresca, solución rica y solución barren), además cuenta con dos celdas electrolíticas y un sistema adsorción en carbón activado, este último tiene la función de captar el oro disuelto en la solución de lavado antes que pase al tanque de agua de proceso, la cual se usa para descargar los sólidos hacia el dique de colas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

La empresa “EAGLECREST EXPLORATION BOLIVIA”, viene operando en la zona de San Simón, desde la etapa de minería subterránea, con una capacidad de explotación de 140 t/d con una ley promedio de 5 g/t a 8 g/t de oro, esta carga es transportada a la planta concentradora, la cual está compuesta por un circuito de chancado primario, secundario, clasificación en seco, molienda, clasificación húmeda, concentración gravimétrica y flotación; la planta de concentración tiene una capacidad de tratamiento de 180 a 200 t/d, lo que se hace en planta es mezclar la carga fresca de mina con arenas de baja ley para obtener un mineral con un promedio de 3,5 a 4 g/t, la eficiencia global de la planta en sus dos circuitos es de 78 a 80 %.

El circuito de gravimetría está compuesto por 4 centrifugas tipo “FALCON” desde donde se obtiene 1 tonelada de concentrado con una ley de 350 a 500 g/t y 1,5 t de pre-concentrado con una ley de 200 a 300 g/t en

oro. Además, se tiene implementado un circuito de flotación, donde se obtiene entre 3 a 4 t/d, con una ley promedio de 65 a 100 g/t.

A mediados del año 2017, la empresa adquirió un equipo de cianuración intensiva ILR-150 Gekko, este proceso es capaz de llegar a eficiencias del 98 %, en un tiempo de proceso de 6 a 12 horas, siendo sus variables operativas más significativas la concentración de cianuro $[CN^-] = 2 \%$, y una mezcla de aire a presión enriquecido con oxígeno, este equipo es compacto en su sistema se obtiene una solución clarificada que puede ser trasladada hacia la línea de electrodeposición directa, debido a que la concentración de oro en la solución suele estar en el rango de 45 a 120 mg/l.

Sin embargo, se requiere optimizar el proceso a partir de pruebas con el equipo para obtener una mejor cinética en el proceso.

1.1.2. Problemática de la investigación

Mediante la presente investigación se resolverán ciertas inquietudes en función a la recuperación del oro a partir de los concentrados producidos en equipos gravimétricos como:

- a) La posibilidad de obtener altas recuperaciones de oro consumiendo menores cantidades de cianuro en el proceso de lixiviación intensiva utilizando el reactor ILR – 150 Gekko.
- b) La posibilidad de obtener altas recuperaciones de oro en un menor tiempo de lixiviación mediante el proceso de lixiviación intensiva utilizando el reactor ILR-150 Gekko.
- c) La posibilidad de utilizar el reactor ILR -150 Gekko sin afectar la rentabilidad por el alto consumo de oxígeno.

1.2. Formulación del problema

La presente investigación nos permitirá estudiar el proceso actual que se viene desarrollando en la planta de cianuración intensiva, en función del tiempo de lixiviación y consumo de reactivos.

Con la presente investigación se estudiará la cinética de lixiviación en el equipo ILR-150 Gekko, para concentrados gravimétricos con tenores de 300 a 500 g/t en oro.

Esta investigación que corresponde al campo de la hidrometalurgia y ensayos de lixiviación en un equipo de cianuración intensiva ILR - 150 Gekko, permitirá determinar si ¿Es posible procesar concentrados con altos tenores de oro aplicando lixiviación intensiva en un reactor ILR-150

Gekko?, las pruebas se realizarán en la planta de procesamiento de la empresa Eaglecrest Exploration Bolivia San Simón- Beni, Bolivia.

1.3. Justificación e importancia

Actualmente, prácticas como la purificación de concentrados utilizando mesas concentradoras u otros equipos gravimétricos requieren intensa mano de obra acarreando significativos riesgos de seguridad y bajas eficiencias de recuperación.

El reactor de cianuración intensiva (ILR) ha sido desarrollado por Gekko Systems con el propósito de optimizar la recuperación de oro desde corrientes de concentrados de alta ley. El ILR -150 Gekko está diseñado para operar en conjunto con un sistema de control distribuido (DCS) o como única unidad con mínimos requerimientos operativos. Todos los sólidos y líquidos, productos de descarga del ILR-150 Gekko pueden ser bombeados nuevamente hacia el circuito de molienda o directamente retirados del circuito. La solución rica es bombeada hacia el cuarto de oro o fundición donde generalmente es tratada mediante un circuito de electrodeposición y la solución barren recirculada hacia el reactor.

Ante tal necesidad de incrementar la productividad, es que la empresa Eaglecrest Exploration Bolivia implementa este sistema, con la

finalidad de lixiviar directamente sus concentrados y obtener oro metálico, para ello evaluamos las variables operativas del equipo para obtener el tiempo óptimo de lixiviación y consumo de reactivos.

1.4. Alcances y limitaciones

No hay limitaciones del estudio, quien desarrolla el tema será asesorado por especialistas en la materia con experiencia en procesamiento de minerales auríferos.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Dar a conocer el método para estudiar la lixiviación de concentrados de oro por el proceso que actualmente se viene desarrollando en el equipo ILR-150 Gekko de la empresa Eaglecrest Exploration Bolivia.

1.5.2. Objetivos específicos

- Estudiar las variables operativas del proceso para determinar el mejor tiempo de lixiviación.
- Estudiar la cinética de disolución en el proceso de lixiviación intensiva de concentrados de oro.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

Mediante el equipo ILR 150 Gekko es posible obtener buenas recuperaciones de oro en minerales aluviales auríferos conociendo la mineralogía y haciendo pruebas de cianuración intensiva a nivel de laboratorio, considerando variables como: granulometría del mineral, consumo de cianuro, concentración de solución lixivante, porcentaje de sólidos.

1.6.2. Hipótesis específica

- Obtener mayor transferencia de oro, desde el concentrado de alta ley hacia la solución lixiviada en un menor tiempo de cianuración intensiva al dosificar 20 ppm de O₂ y mantener una concentración de 2 % CN⁻ en solución.
- Alcanzar extracciones de oro que estén en un rango de 95 – 98 % en tiempos de lixiviación de 4 y 8 horas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El procesamiento de menas auríferas para extraer el oro con un máximo retorno financiero, involucra efectuar cada una de las etapas que van desde el minado hasta conseguir un concentrado o producto comerciable. Para recuperar la máxima cantidad de oro, la mena debe ser molida finamente a fin de liberar las partículas de oro, para luego separarlo gravimétricamente o por algún método de acción química.

El conocimiento de las características minerográficas, de los depósitos, la dureza y la friabilidad del mineral aurífero, su distribución de oro y las condiciones de costos, son los parámetros fundamentales que determinan la selección del circuito óptimo de conminución y los procesos siguientes.

Para la lixiviación de los minerales por agitación es necesario efectuar una molienda, tal que se exponga a la mayor cantidad del metal noble a la acción del disolvente.

La cianuración es el método más importante que se ha desarrollado para la extracción del oro de sus minerales y se usa a escala comercial en todo el mundo. La química del proceso de cianuración se basa en el hecho, de que bajo condiciones oxidantes, el oro y la plata pueden disolverse y acomplejarse en soluciones de cianuros alcalinos.

El oro contenido en el licor resultante de la lixiviación, puede recuperarse mediante cualquiera de los siguientes procesos: precipitación con polvo de zinc o adsorción en carbón activado.

2.2. Lixiviación

El principio básico de la lixiviación (cianuración) es aquella en que las soluciones alcalinas débiles tienen una acción directa disolvente preferencial sobre el oro y la plata contenidos en el mineral. La reacción enunciada por Elsner en su Journal PrakChen (1946), es la siguiente:



La química involucrada en la disolución de oro y plata en el proceso de cianuración en pilas es la misma aplicada en los procesos de cianuración por agitación.

El oxígeno, esencial para la disolución del oro y plata, es introducido en la solución de cianuro, mediante la inyección directa de aire al tanque solución de cabeza, por irrigación en forma de lluvia y por bombeo de la solución recirculante.

La velocidad de la disolución de los metales preciosos en soluciones de cianuración depende del área superficial del metal en contacto con la fase líquida, lo que hace que el proceso de disolución sea un proceso heterogéneo; la velocidad de disolución depende también de la velocidad de agitación lo que indica que el proceso sufre la presión de un fenómeno físico.

Otros factores que influyen en la velocidad de disolución son las siguientes:

- **Tamaño de la partícula:** Cuando se presenta oro y plata gruesa libre en la mena, la práctica generalizada es recuperada por medio de trampas antes de la cianuración ya que las partículas gruesas podrían no disolverse en el tiempo que dura el proceso. Bajo condiciones consideradas ideales con respecto a la aereación y agitación, Barsky encontró que la velocidad mínima de disolución de plata es $3,25 \text{ mg/cm}^2\cdot\text{hora}$

- Oxígeno; Tiene un rol fundamental en la lixiviación del oro y la plata, pues la recuperación de oro y plata está directamente relacionada con la cantidad de oxígeno disuelto en la pulpa mineral. Cuando se tienen faenas mineras a gran altura, como es de normal ocurrencia en nuestro país y en todo el cordón de la Cordillera de los Andes, la cantidad de oxígeno disuelto disminuye, lo que afecta en gran medida los resultados metalúrgicos. En estos casos de la inyección de oxígeno es muy recomendada, puesto que aumenta, como se dijo anteriormente, las recuperaciones de oro y plata, y además disminuye los consumos de cianuro.
- Concentración de la solución de cianuro; La solubilidad del oro en una solución de CN aumenta al pasar de las soluciones diluidas a las concentradas. La solubilidad es muy baja con menos de 0,005 % NaCN, crece rápidamente cuando tienen 0,01 % NaCN y después lentamente, llegando al máximo cuando contiene 0,25 % NaCN. La proporción más eficaz es de 0,05 a 0,07 % NaCN. La concentración usual de CN para el tratamiento de menas de oro es de 0,05 % NaCN y para menas de plata de 0,3 %, para concentrados de oro-plata, la fuerza de NaCN está entre 0,3 a 0,7 %. El NaCN es el más usado en el proceso de cianuración, aunque también se emplea el KCN.
- Temperatura; La velocidad de disolución de los metales en una solución de NaCN aumenta con el incremento de la temperatura,

hasta 358 K (85 °C); la descomposición del cianuro es un serio problema.

- Porcentaje de finos; Este aspecto es muy importante, porque, cuando el porcentaje de finos es alto, mayor al 20 % del total (< -10 mallas, 1,7 mm) las partículas tienden a aglutinarse en consecuencia no dejan pasar las soluciones de cianuro por lo que estos minerales requieren otro tratamiento, posiblemente curado con cal, cemento o ambos para lograr aglomerarlos y facilitar la percolación.
- Alcalinidad protectora; Las funciones del hidróxido de calcio en la cianuración son los siguientes:
 - a) Evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis.
 - b) Prevenir perdidas de cianuro por acción del CO₂ de aire.
 - c) Neutralizar los componentes ácidos.
 - d) Facilitar asentamiento de las partículas finas de modo que pueda separarse la solución rica clara de la mena cianurada.

2.3. Tipos de Lixiviación

Hay dos tipos de lixiviación: lixiviación por agitación y lixiviación en pila.

2.3.1 Lixiviación por agitación:

La mena molida a tamaños menores a las 150 mallas (aproximadamente tamaños menores a los 105 micrones), es agitada con

solución cianurada por tiempos que van desde las 6 horas hasta las 72 horas. La concentración de la solución cianurada está en el rango de 200 a 800 ppm (partes por millón equivale a gramos de cianuro por metro cúbico de solución).

La velocidad de disolución del oro nativo depende entre otros factores, del tamaño de la partícula, grado de liberación, contenido de plata.

Es la práctica común, remover el oro grueso (partículas de tamaño mayores a 150 mallas o 0,105 mm), tanto como sea posible, mediante concentración gravitacional antes de la cianuración, de esta manera evitar la segregación y pérdida del mismo en varias partes del circuito.

Es de suma importancia, aparte de determinar la naturaleza de los minerales de oro, poder identificar la mineralogía de la ganga, ya que ésta puede determinar la efectividad o no de la cianuración. Esto porque algunos minerales de la ganga pueden reaccionar con el cianuro o con el oxígeno, restando de esa manera la presencia de reactivos necesaria para llevar adelante la solubilización del oro.

Se realizan ensayos a escala laboratorio, con el objeto de determinar las condiciones óptimas para el tratamiento económico y eficiente de la mena.

Las variables a determinar son las siguientes:

- Consumo de cianuro por tonelada de mineral tratado.
- Consumo de cal por tonelada de mineral tratado.
- Óptimo grado de molienda.
- Tiempo de contacto, ya sea en la lixiviación por agitación como en la lixiviación por percolación.
- Concentración más conveniente del cianuro en la solución.
- Dilución más adecuada de la pulpa.

2.3.2. Lixiviación en pila

El método de cianuración en pila ha probado ser la técnica más económica para recuperar metales preciosos.

El método de lixiviación en pila, consiste en formar un pad con el mineral a beneficiar, generalmente en rangos de tamaños por debajo de 0,0508 m (2") hasta 0,00635 m (1/4"), lo que permite ahorrar costos por molienda fina que a veces representa un 50 – 70 % del costo total en operaciones de cianuración por agitación.

Sin embargo algunos minerales pueden presentar serios inconvenientes durante el tratamiento o beneficio metalúrgico, los cuales pueden ser:

- Poco o nula permeabilidad del pad o pila debido a la presencia de abundante material fino menor a 20 mallas (850 micras) bajo la forma de arcillas, limonitas, etc.
- Presencia de elementos o compuestos cianicidas: As, Sb, Hg, CuO, carbón, telurios, aguas ácidas, etc., originando fuertes consumos de cianuro y cal.
- Intercrecimientos mineralógicos de oro y plata en tamaños atómicos o sub-atómicos, no permitiendo exponer las partículas valiosas a la solución lixivante.

Las razones anteriormente expuestas repercuten en recuperaciones pobres de metales preciosos, por lo que es necesario investigar para cada mineral el método de beneficio y las condiciones más adecuadas.

Los puntos N° 2 y 3, requiere especial atención, algunos lo denominan "minerales refractarios" que son aquellos minerales que no responden al método de cianuración directa.

2.3.3. Cianuración intensiva

Es un proceso que se lleva a cabo en un reactor de cianuración intensiva para la lixiviación de concentrados de alto grado. Típicamente, estos son concentrados de oro y plata producidos por concentración por

gravedad. Para una máxima recuperación y rentabilidad se utiliza un proceso por lotes. Para permitir un rendimiento óptimo y minimizar la interacción del operario, la unidad es automatizada. Una solución de alto grado es producida para procesarla aguas abajo por electroobtención directa u otros procesos adecuados.

Las partes principales están descritas en el tabla 1.

Tabla 1
Partes principales del reactor Gekko.

Parte	Función
Estanque de alimentación.	La alimentación desde el proceso previo es acumulada en el estanque de alimentación para el próximo lote.
Tambor giratorio.	La solución es acumulada en el estanque de solución antes de ser transferida a electroobtención.
Sumidero y bomba.	La bomba es usada para transferir y recircular los lodos y la solución a varios destinos, dependiendo de la etapa en curso.
Interconexión de tuberías y válvulas.	Dirige los reactivos, la solución y los lodos al destino correcto, dependiendo de la etapa en curso.

Fuente: Manual Inline Leach reactor Batch 1000 series (2016).

2.3.3.1. Fundamentos de operación

El equipo ILR trabaja sobre el principio de laboratorio de la botella giratoria mediante el cual el tambor del ILR es rotado sobre su eje horizontal para lograr un máximo rendimiento de lixiviación para recuperar oro y plata

(ambos libres y complejos) desde concentrados de alto grado. El proceso de lixiviación con cianuración intensiva se realiza a elevados niveles de cianuro de sodio entre los rangos 5 000 – 50 000 ppm en un ambiente rico en oxígeno > 15 ppm de oxígeno disuelto (10 ppm al utilizar H₂O₂).

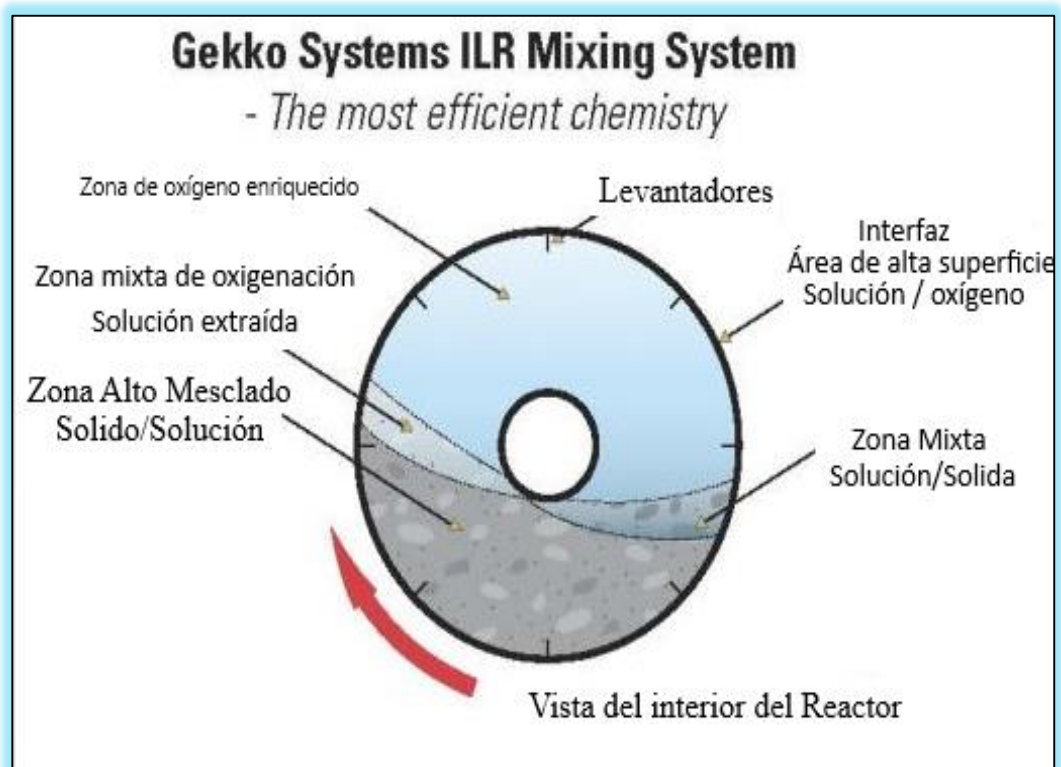


Figura 1. Principio de lixiviación en tambor.
Fuente: Manual Inline Leach reactor Batch 1000 series (2016).

2.3.3.2. Descripción del equipo

El reactor de lixiviación de InLine tiene una buena funcionalidad, mediante la adición de uno o más módulos de tambor a la unidad base del

tambor del ILR 150. Los estanques de alimentación y de solución son dimensionados para adecuarse a la capacidad y requerimientos del sitio.

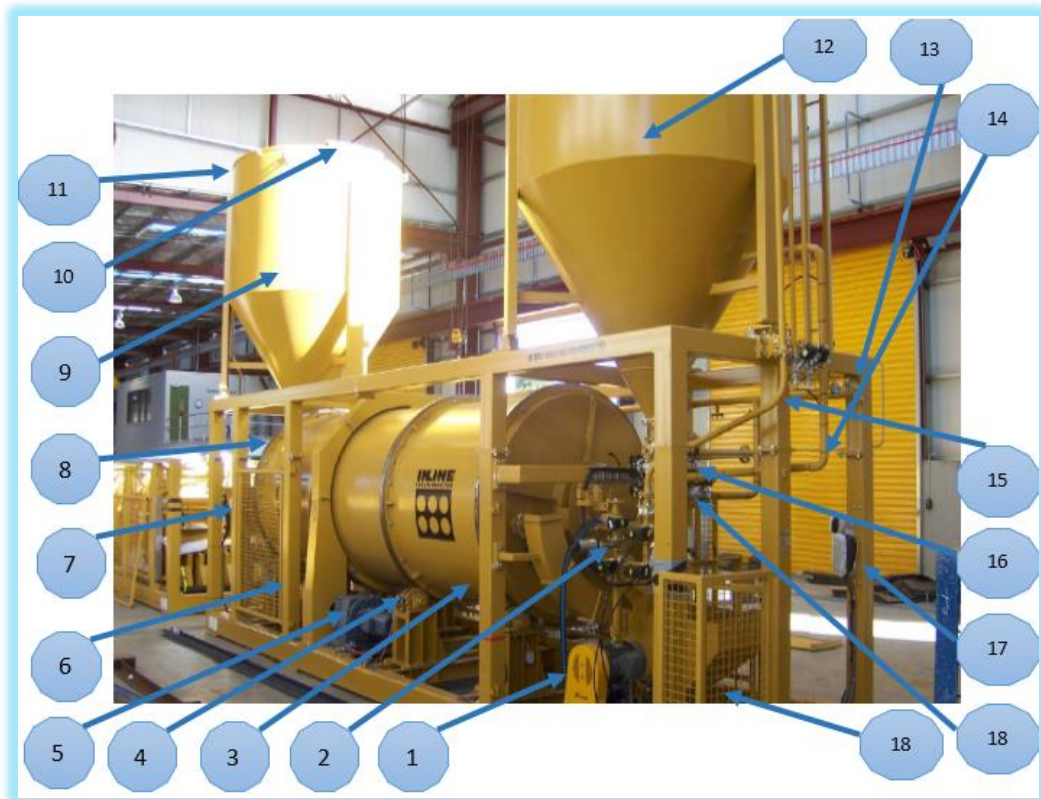


Figura 2. Características típicas del Gekko Batch ILR.
Fuente: Manual Inline Leach reactor Batch 1000 series (2016).

La descripción de los puntos de la figura 2 se da a continuación:

1. Bomba de sumidero y motor del ILR.
2. Tubos y válvulas de descarga de la bomba.
3. Tambor del IRL.
4. Ensamble de ruedas.
5. Motor y caja de cambios.
6. Marco del ILR.

7. Cabina VSD, PLC y HMI.
8. Célula de carga del estanque de alimentación.
9. Estanque de alimentación del ILR.
10. Escotilla de inspección
11. Agua del proceso principal.
12. Estanque de solución del ILR.
13. Estructura de soporte del oxígeno.
14. Tuberías de solución/reactivos.
15. Célula de carga del estanque de solución.
16. Válvulas de adición de reactivos.
17. Detención de emergencia.
18. Cabina neumática.
19. Sumidero del ILR.

2.3.3.3. Ciclos del modelo Batch Gekko ILR-150

La secuencia de operación del reactor Batch Gekko ILR-150 es el siguiente:

1. Ajuste del volumen de solución y dosificación de reactivos.
2. Lixiviación del mineral por recirculación de solución a través del tambor.
3. Drenaje del tambor y clarificación de la solución rica.
4. Lavado de sólidos con agua.
5. Drenaje y clarificación de la solución de lavado.
6. Vaciado de sólidos.
7. Drenaje final de solución.
8. Transferencia de la solución hacia electrodeposición.

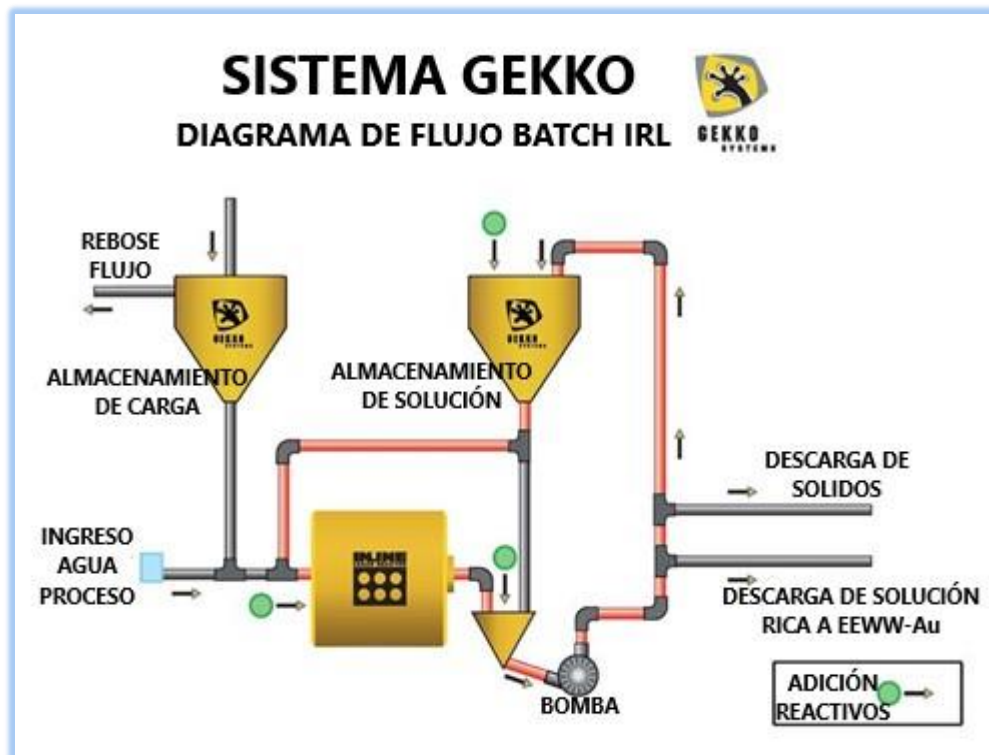


Figura 3. Flowsheet sistema batch Gekko ILR 150
Fuente: Manual Inline Leach reactor Batch 1000 series (2016).

2.4. Gravimetría de minerales auríferos

2.4.1. Introducción

El beneficio de materias primas de metales preciosos impone exigencias especiales a la técnica de concentración; las causas son las propiedades físicas, geoquímicas o mineralógicas del oro. El oro se encuentra, por lo general, en yacimientos primarios con tenores de 100 - 200 g/t como máximo y de 1 – 2 g/t como mínimo; el límite inferior

representa al corte (cut-off) de los yacimientos económicamente explotables; yacimientos sedimentarios tienen contenidos metálicos entre 0,2 y 20 - 50 g/t, aproximadamente. De acuerdo a esto, los factores de enriquecimiento en el beneficio tienen que ser elevados, al mismo tiempo se tienen que explotar y beneficiar, en función de su contenido, cantidades convenientes de mineral bruto para cubrir los costos de explotación y de beneficio. De acuerdo a la caracterización mineralógica de las menas auríferas, el proceso de concentración gravimétrica es solo una posibilidad de aplicación a ellas. Los minerales básicos que componen la mena definen el esquema de procesamiento. La caracterización mineralógica, química y metalúrgica es una etapa previa al estudio de concentración, cuyo desarrollo es esencial para obtener la mayor recuperación de oro. La concentración de menas auríferas se ve afectada, por contextos como:

Granulometría de ocurrencia y forma de las partículas de oro.

Liberación del oro y tipos de asociaciones con otras especies mineralógicas, tanto de ganga como de elementos de valor constituidos en granos mixtos.

Presencia de oro en menas complejas, incluso presencia de oro en la red cristalina de algunos sulfuros metálicos, como se puede observar en la Figura 4.



Figura 4. Asociación de oro en minerales sulfurosos.
Fuente: Hinojosa O., 2016.

El elevado peso específico del oro ($19,32 \text{ g/cm}^3$) hace que este metal, aunque esté en tamaños muy pequeños, pueda ser separado de su ganga, generalmente cuarzosa de peso específico mucho más bajo ($2,65 \text{ g/cm}^3$), por medio de la concentración gravimétrica desde pulpas acuosas.

Cuando se presenta oro libre, grueso y de superficie limpia, hace fácil la amalgamación con mercurio y su recuperación en forma de amalgama.

Cuando el oro se encuentra asociado a sulfuros metálicos (como hierro, cobre, plomo y zinc); o se encuentra asociado a ganga cuarzosa en forma fina y también como telururos, el proceso de concentración más indicado es la flotación.

Cuando el oro se encuentra con bajo contenido y al estado de partículas finas asociadas a ganga cuarzosa, entonces, el proceso aconsejable es la cianuración como método de extracción por disolución del oro, siempre que no intervengan compuestos extraños consumidores de cianuro.

Cuando la asociación del oro con sulfuros metálicos es tan fina que técnicamente sea imposible separarlos con una molienda fina, en tal caso el proceso de flotación seguido de cianuración de los concentrados directamente, o previa tostación de ellos, puede ser una solución.

También se puede presentar el caso de menas en las que el oro se encuentra en parte libre y en parte finamente diseminado en la ganga; en tal caso, es recomendable un proceso combinado de flotación-cianuración. Por otra parte, si el oro libre está en tamaños relativamente gruesos, que permitan su recuperación por concentración gravitacional, se realiza un procesamiento combinado de concentración gravitacional-cianuración.

Menas auríferas consideradas refractarias son aquellas en las que el oro está asociado o incluido en sulfuros de hierro, o en sulfoarseniuros o arseniatos, el proceso de lixiviación ácida a presión en autoclaves previo a la cianuración es posible realizar con alta eficiencia en la recuperación del oro.

2.4.2. Fundamento de la gravimetría

En este punto revisaremos los conceptos teóricos relacionados con los métodos de concentración y extracción más comunes a las menas de oro. Para el oro, dada su alta densidad, la concentración gravimétrica ha sido uno de los métodos tradicionales para su beneficio. Los métodos gravimétricos han recobrado interés debido a su bajo impacto ambiental, en suma, el grado de desarrollo de la actual tecnología ha permitido perfeccionar equipos que permiten extender la concentración aun a tamaños finos. Otro método comúnmente usado en el beneficio de las menas de oro lo es la flotación. Éste, suele ser utilizado cuando las especies de oro se encuentran asociadas a pirita, cobre o arsenopirita. Pero sin lugar a dudas el método más extensamente usado lo es la cianuración. Muchos de los proyectos recientes, los cuales se localizan en la parte noreste del país envuelven procesos combinados de flotación - cianuración.

2.5. Concentración por flotación

Entre los métodos convencionales de tratamiento de menas auríferas se tienen la concentración gravimétrica y la lixiviación por cianuración. Sin embargo, cada uno de estos procesos tiene sus propias dificultades; pérdidas de oro fino en concentración gravimétrica y conocimientos técnicos para el manejo adecuado del cianuro en la lixiviación. En el caso particular de la concentración gravimétrica, el principal problema es la recuperación de partículas finas de oro que irremediablemente son arrastradas a las colas, inclusive partículas relativamente gruesas que tienen formas especiales favorecen a que sean arrastradas a las colas. De una manera general, se debe indicar que, tomando las precauciones necesarias y los equipos apropiados, podrían ser recuperables partículas por encima de 75 micrones; pero, cuando no se tiene el cuidado preciso al tratar materiales que contengan oro fino y cuando tampoco se cuenta con los equipos adecuados, las pérdidas que se producen llegan a mayores rangos de fracciones granulométricas y que fácilmente pueden ser de hasta 300 micrones. La flotación es otra buena alternativa para concentrar el oro fino cuando este se encuentra libre en la muestra o acompañado de sulfuros. Este proceso, puede resultar en el presente una posibilidad real para mejorar los índices metalúrgicos, puesto que las pérdidas de oro fino son realmente considerables cuando se usan

medios gravimétricos y el uso de la cianuración no es nada atractivo en muchos lugares, especialmente por el aspecto ambiental. La flotación se usa bastante en la recuperación de oro, sin embargo, los objetivos y el modo de aplicación son muy variables y dependen del tipo de mineral, de las asociaciones de oro, otros valores metálicos, consideraciones de mercado y requerimientos ambientales. La mineralogía del mineral y las asociaciones de oro son fundamentales en la recuperación de oro. El uso de la flotación, en la concentración de oro, se rige por la mineralogía del oro y de la mena en cuestión. Los factores fundamentales son el tamaño del mineral/oro, tamaño de liberación, asociación del oro y tipo de minerales de la ganga y otros minerales valiosos. Los reactivos que se emplean para el tratamiento de menas auríferas por flotación son, de una manera general, los mismos que habitualmente se utilizan en el tratamiento de menas sulfurosas, especialmente los xantatos como colector principal.

2.5.1. Factores que influyen en la flotación de oro

Los factores que influyen en la recuperación del oro son:

- Liberación. - El principal requerimiento mineralógico para la flotación del oro es que esté liberado; es decir, como partículas de oro libre y que forme parte de las partículas que son flotables. Esta condición es la que usualmente se requiere para la recuperación del oro que

se encuentra en la superficie de los minerales sulfurosos. Pero si son óxidos y/o silicatos los que forman parte del mineral aurífero, la flotabilidad del oro es más baja y depende sobre todo de sus respectivas áreas de superficie de hidrofobicidad.

- Recubrimiento (capas).- La flotabilidad de oro libre depende de las condiciones de exposición a la superficie. Ejemplo, una capa de sal de metal hidrofílica ha sido precipitada en la superficie del oro, reduce la superficie total hidrofóbica y consecuentemente reduce la recuperación del oro. Estos precipitados comúnmente contienen óxidos de hierro (Fe^{+3}) o hidróxidos, los cuales se forman debido a que ambos minerales contienen hierro.

En depósitos antiguos de colas, de varias décadas, se producen disoluciones de minerales, que tiene lugar la precipitación, resultando la formación de capas de sales de Ca, Mg, Mn, Al y Fe como óxidos o carbonatos.

- Tamaño de partícula.- El tamaño de partícula tiene un gran efecto en la recuperación del oro por flotación, por su alta densidad. La flotación es efectiva para partículas en el rango de 20 - 200 micras. Partículas más finas influyen negativamente en la selectividad debido a la co-flotación de componentes ganga. En caso de flotar tamaños de partículas relativamente gruesas, como alternativa se

puede reducir la alta densidad del oro aumentando la densidad de pulpa y trabajando por ejemplo a 35 % sólidos, con esto se reduce la sedimentación de las partículas de oro. Pero para partículas mayores a 200 o 250 micras de oro lo más recomendable es usar gravimetría y amalgamación.

2.6. Concentración centrífuga

La concentración gravimétrica de minerales auríferos se realiza utilizando diferentes equipos que actúan bajo la aceleración de la gravedad normal del campo gravitacional terrestre, en esas condiciones, cada equipo tiene limitaciones propias en cuanto al tamaño de partículas que se pueden procesar y en cuanto al rendimiento que se puede obtener en la recuperación de los elementos valiosos. A tamaños finos, las fuerzas hidráulicas y de fricción rebasan a la de gravedad, por lo cual la eficiencia de separación de los concentradores gravimétricos disminuye drásticamente. Para superar esto, se han diseñado concentradores que intensifican las fuerzas gravitacionales para que la separación se lleve a cabo a un valor de varias veces la fuerza de gravedad G . Con estos concentradores se han resuelto muchos de los problemas para la aplicación de la concentración gravimétrica en la recuperación de oro libre en circuitos de molienda; como son la recuperación de oro de tamaño fino (< 150 micras), el balance de agua, la capacidad, el mantenimiento y el control de

la operación de los concentradores en los circuitos. Los concentradores gravimétricos de este tipo operan con un campo centrífugo de hasta 300 G. Su operación consiste en introducir pulpa hasta el fondo de un reactor cónico truncado invertido, el cual gira a una velocidad de 400 rpm, la pared del cono está acanalada, inyectándose agua en las canaletas para fluidizar las partículas presentes en ella, evitar su compactación y mejorar la eficiencia en la concentración de oro. Los tipos de concentradores centrífugos más utilizados están basados en el mismo principio, pero difieren en su diseño técnico. Desde el punto de vista de su modalidad de trabajo, los equipos de concentración gravimétrica por centrifugación se agrupan en tres tipos, estos son: - Centrífugas de lecho sedimentado (centrífuga china y centrífuga Gekko). - Centrífugas de lecho fluidizado (Knelson y Falcon). - Centrífugas de lecho fluidizado pulsante (jig Kelsey y concentrador MGS). Las centrífugas ofrecen buena seguridad contra robos y ahorran fuerza de trabajo significativamente (lo cual puede ser una desventaja en la pequeña minería). Con las centrífugas se pueden lograr altos radios de enriquecimiento, para la posibilidad de fundición directa, pero a menudo se necesita otro equipo más (ej. una mesa concentradora).

En los circuitos de molienda, los concentradores centrífugos son utilizados efectivamente para recuperar el oro liberado. Las ventajas que se atribuyen a esta nueva técnica de concentración son las siguientes:

- Buena recuperación, generalmente >70 %.
- Elevada capacidad de tratamiento.
- Equipo muy compacto.
- Elevado radio de enriquecimiento.

A estas ventajas ya reconocidas, pueden añadirse otras que resulten de la aplicación específica a cada mena en particular, como por ejemplo menor consumo de agua, incorporación de reservas actualmente no incluidas a los programas de producción, menor impacto ambiental por no emplear reactivos ni tener emanaciones gaseosas de contaminantes, etc.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Se utilizó el método de investigación aplicada para el diseño y desarrollo del presente trabajo, mediante los pasos de observación (recopilación de información y de materiales), experimentación y elaboración de las conclusiones.

En el diseño de la investigación experimental, se consideraron variables específicas que intervendrán en los resultados.

3.2. Población y muestra

Actualmente la empresa “EAGLECREST EXPLORATION BOLIVIA”, viene operando en la zona de San Simón, desde la etapa de minería subterránea, con una capacidad de explotación de 140 t/d con una ley promedio de 5 a 8 g/t, esta carga es transportada a la planta concentradora, la cual está compuesta por un circuito de chancado primario, secundario, clasificación en seco, molienda, clasificación húmeda, concentración gravimétrica y flotación; la planta de concentración tiene una capacidad de

tratamiento de 180 a 200 t/d, lo que se hace en planta es mezclar la carga fresca de mina con arenas de baja ley para obtener un mineral con un promedio de 3,5 a 4 g/t, la eficiencia global de la planta en sus dos circuitos es de 78 a 80 %.

El circuito de gravimetría está compuesta por 4 centrifugas tipo “Falcón” desde donde se obtiene 2 toneladas de concentrado con una ley de 350 a 500 g/t y 2 toneladas de pre-concentrado con una ley de 200 a 300 g/t en oro. Además se tiene implementado un circuito de flotación, donde se obtiene entre 3 a 4 t/d, con una ley promedio de 65 a 100 g/t.

En las operaciones en la planta de lixiviación intensiva de concentrados, se utiliza como alimento los concentrados gravimétricos, el otro producto obtenido como concentrados de flotación son enviados a venta directamente.

3.3. Caracterización del concentrado

La serranía de San Simón es un mega-yacimiento de oro y piedras preciosas sólo comparable con la mina de plata de San Cristóbal en Potosí y el gran yacimiento de hierro en el Mutún. Aquí operó durante más de 17 años la trasnacional colombo-canadiense Eaglecrest, subsidiaria del Grupo Soros que cotiza en la Bolsa de Valores de Toronto. Eaglecrest realizó

extensas perforaciones en el cerro San Simón, en la provincia Iténez del Beni.



Figura 5. Ubicación de la planta metalúrgica en la provincia Iténez del Beni.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, a partir del 2003, cinco áreas fueron descartadas y quedaron como vetas factibles las áreas de “Doña Amelia”, “Marco María”, “Doña Ángela”, “Buriti” y Paititi”, abarcando una superficie de 52,5 kilómetros cuadrados.

La mina “Doña Amelia” resultó ser la más pródiga, con filones de alta ley en el subsuelo y aluviones a flor de tierra. La operación de venta de la mina de oro de San Simón tiene similitudes con las crisis que depreciaron

ficticiamente los valores bursátiles de la mina de plata en el proyecto San Cristóbal de Potosí y del proyecto siderúrgico del Mutún en Santa Cruz.



Figura 6. Bocamina abierta por Eaglecrest en el cerro de San Simón, año 2017.
Fuente: Elaboración propia.

El mineral que ingresa a planta de concentración de la empresa es una combinación de varias minas y a la vez la empresa compra arenas de las cooperativas aledañas que realizan procesos de molienda y amalgamación; el concentrado obtenido en el circuito de gravimetría que se obtiene dos:

- Línea primaria: 300 a 500 g/t de Au.
- Línea secundaria: 200 a 300 g/t de Au.



Figura 7. Concentradores gravimétricos ICON.
Fuente: Elaboración propia.

3.4. Toma de muestras

Para realizar las pruebas N° 16 a N° 28 se tomaron solo concentrados de gravimetría, usualmente se carga entre 1100 kg a 1300 kg, obteniendo como promedio 1200 kg de concentrado gravimétrico con una humedad promedio de 18 a 20 %.

Cada lote es pesado, codificado y se obtiene una muestra para mandar a laboratorio de la planta donde es analizada la ley de oro y la humedad.

3.5. Propiedades físicas y químicas

3.5.1. Propiedades físicas

Se determinó la densidad del mineral de mina y se evaluó la granulometría del concentrado que se utilizó como alimento del equipo ILR – 150 Gekko.

- a. Densidad del mineral mina, promedio es de 2,39 g/cm³.
- b. Análisis granulométrico del mineral mina (ver tabla 2).

Tabla 2
Análisis granulométrico del concentrado.

N° Malla	µm	Pesos (g)	% Retenido	% Pasante
48	300	122	7,59	92,41
65	212	205	12,75	79,66
100	150	654	40,67	38,99
150	106	350	21,77	17,23
200	75	120	7,46	9,76
400	38	62	3,86	5,91
ciego	17	95	5,91	0,00
PESO DE MUESTRA		1608	100,00	

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Propiedades químicas

Al concentrado extraído de las centrifugas, se cuantificó la cantidad de oro por copelación, obteniendo diferentes contenidos de oro como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3
 Contenido de oro en concentrados gravimétricos.

N° Batch	Peso (Kg)	Humedad (%)	Ley (g/t)
16	1,21	12,20	294,60
17	1,16	14,10	359,40
18	1,20	13,10	509,90
19	1,32	13,20	581,90
20	1,30	19,70	429,10
21	1,24	15,70	273,20
22	1,33	13,80	247,30
23	1,26	15,60	212,20
24	1,30	15,60	227,70
25	1,10	7,90	254,40
26	1,24	11,30	282,20
27	1,10	4,80	282,20
28	1,26	13,90	341,90

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Operacionalización de variables

a) Variables independientes:

- Tiempo de lixiviación.
- Granulometría.
- Concentración de solución lixivante.

b) Variable dependiente:

- Recuperación.

3.7. Dosificación de reactivos

Los reactivos pueden ser agregados en la alimentación al reactor mediante bombas dosificadoras. Para operaciones típicas se recomienda

el uso de 2 % de cianuro de sodio a un pH de 11,5 a 12,5. Acelerantes no son normalmente recomendados pero en ciertas ocasiones pueden ser agregados a una concentración de 0,5 %.

Altos niveles de oxígeno disuelto (20 ppm) en la solución proveniente de la electrodeposición son generados tratando la solución a temperatura ambiente; lo cual mejora significativamente los tiempos de lixiviación y permite que partículas gruesas sean lixiviadas en extremadamente bajos tiempos de retención.

3.8. Costos estimados

Se estima los costos de operación estimados entre 600 a 700 dólares por proceso o batch (la producción de oro dependiente de la ley en concentrado).

3.9. Materiales

- 1000 kg de concentrados de la línea de gravimetría.
- 1 tacho de cianuro de sodio.
- 4 botellas de 6 m³ de oxígeno.
- 3 kg de soda caustica (1 kg en lixiviación y 2 kg en electrólisis).
- 40 g de floculante.
- 750 g de viruta de fierro (celda electrólisis).
- Ácido clorhídrico al 10 % (digestión ácida de los cátodos).
- Flux (Bórax, nitrato de sodio, fluoruro de sodio, sílice).

3.10. Equipo

- Un reactor IRL-150 Gekko.
- Un compresor de aire.
- Una celda electrolítica para recuperación de oro.
- Un rectificador de 150 amperios.
- Una bomba de recirculación en electrólisis.

3.11. Instrumentos

- Un pH-metro digital industrial con sistema de alarma.
- Un amperímetro digital con pinza amperimétrica.

3.12. Operación del reactor de lixiviación en línea – modelo batch IRL-150 GEKKO

El concentrado proveniente del sistema de recuperación primaria por la línea de gravimetría tiene tenores de 200 g/t a 500 g/t de oro, con una granulometría promedio de 80 % a 65 mallas y una humedad promedio de 13 %, fue cargado al cono de alimentación del reactor para su pesado y toma de muestra, desde donde se alimentó al equipo por medio de sifonamiento del sólido (concentrado de oro), usando solución pobre del mismo proceso hasta el comienzo del ciclo de lixiviación.

El reactor de lixiviación en línea trabaja bajo el principio de laboratorio de ensayos en botellas para mantener el máximo contacto entre

sólidos y solución, un tambor horizontal de baja velocidad de rotación y con un especial sistema de “levantadores” y aireación maximizan la performance de lixiviación.



Figura 8. Sistema de mezclado IRL Gekko.
Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de residencia fue establecido en el laboratorio de Brasil y Australia, el cual oscila entre 6 a 8 horas de proceso dependiendo la ley de concentrados. Durante la fase de lixiviación la solución es continuamente re-circulada a través de los sólidos desde el cono de solución donde se agregan los reactivos necesarios, tales como oxígeno y cianuro a fin de que estén permanentemente disponibles para la reacción de lixiviación.

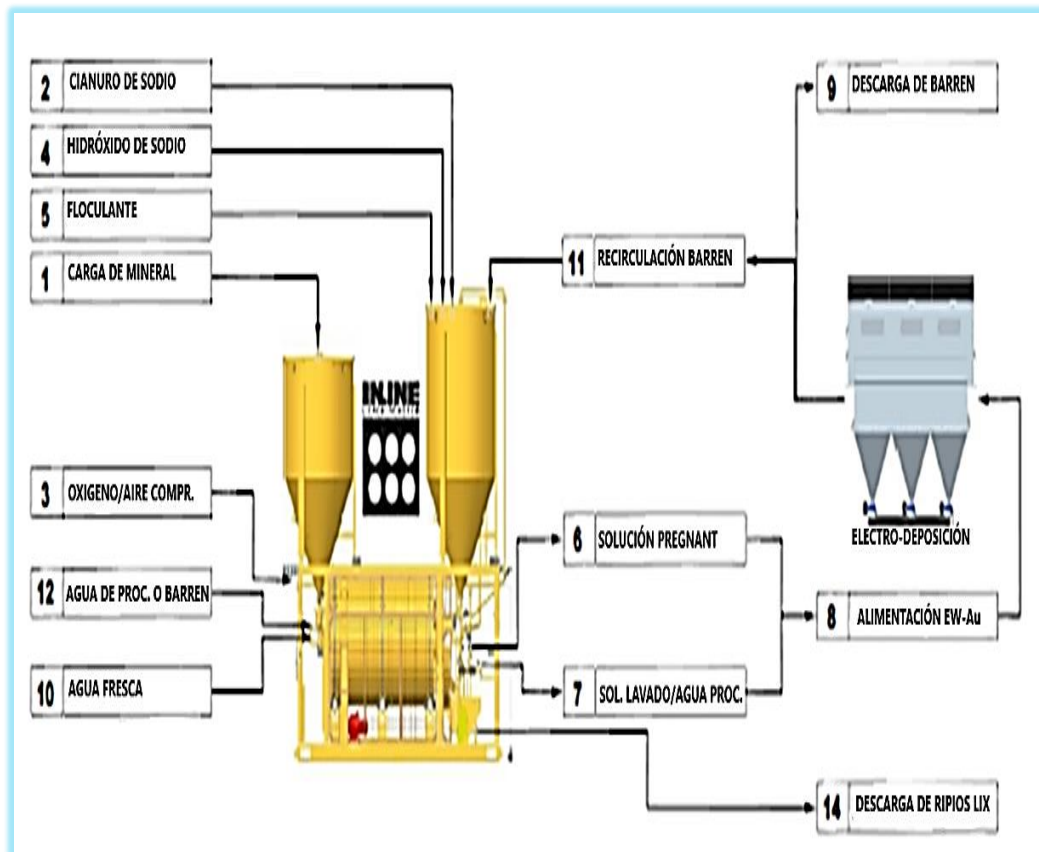


Figura 9. Ciclo de lixiviación intensiva IRL Gekko.
Fuente: Elaboración propia.

Al completar el ciclo de lixiviación, la solución es clarificada y luego bombeada al circuito de electrodeposición. Los sólidos remanentes (colas) son vaciados mediante el giro reverse del tambor y bombeados hacia el circuito (dique de colas). La solución rica se puede recuperar mediante un sistema de electrodeposición directa debido a que las soluciones manejan concentraciones de 75 a 120 g/m³. La solución pobre proveniente de la electrodeposición es luego bombeada hacia el tanque que retorna al equipo ILR - 150 para su reutilización y aprovechamiento del cianuro residual.

3.13. Ciclos del modelo batch - Gekko IRL 150

- a) Ajuste del volumen de solución y dosificación de reactivos.
- b) Lixiviación del mineral por recirculación de solución a través del tambor.
- c) Drenaje del tambor y clarificación de la solución rica.
- d) Lavado de sólidos con agua.
- e) Drenaje y clarificación de la solución de lavado.
- f) Vaciado de sólidos.
- g) Drenaje final de solución.
- h) Transferencia de la solución hacia electrodeposición.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

La empresa de servicios Gold Recovery Services SRL, fue contactada para dar el servicio de levante de operaciones de este sistema de cianuración intensiva, en la empresa ya se habían corrido pruebas con el equipo (batch 05 a batch 15), teniendo eficiencias, de 65 % a 84 %, según sus reportes técnicos, en base a esta información, al manual del equipo y del apoyo del personal de operaciones de la planta, es que se estableció el procedimiento de trabajo logrando eficiencias altas, dicho equipo presenta dos formas de trabajo una manual, en donde el operador controla las 20 válvulas neumáticas del sistema y otra en forma automática, mediante su propio software, logrando los siguientes resultados:

Tabla 4
Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-16.

Tiempo (h)	Código	Sol. LIX (mg/l)	Oro Soluciones (g)	Recuperación Oro (%)
0	ILR - B-16 SOL INICIO (8-09-17)	41,9	129,9	48,70
2:00	ILR - B-16 SOL 2 HRS (8-09-17)	69,0	214,0	80,20
4:00	ILR - B-16 SOL 4 HRS (8-09-17)	71,1	220,5	82,64
8:00	ILR - B-16 SOL FINAL (8-09-17)	26,2	81,3	30,45

Fuente: Elaboración propia.

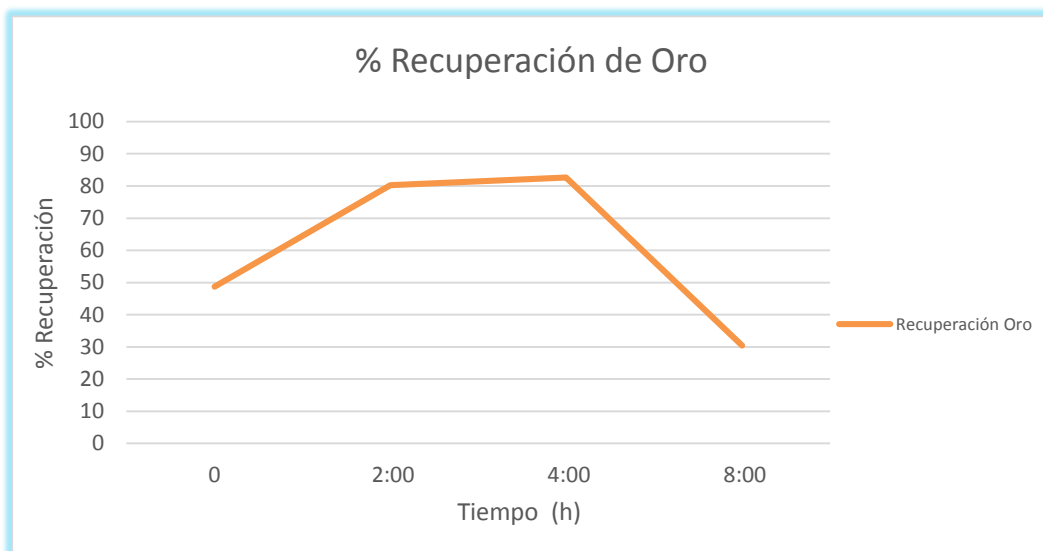


Figura 10. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-16.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5
Balance en cianuración de oro en 8 horas en lixiviación, prueba B-16.

	Contenido Au					Repartición %	Recuperación (%)
	Kg	m ³	Au mg/ℓ	Au g/t	Au g		
Solución LIX	-	0,0031	71,10	-	220,51	82,64	
Solución Lavado	-	1,51	28,40	-	42,85	16,06	98,70
Ripio	1053,60		-	3,30	3,50	13,00	
Total en Oro					266,80		
Cabeza Calculada "BALANCE"				253,30			
Cabeza Analizada "LABORATORIO"				294,60			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6
Ley en sólidos a diferentes tiempos de lixiviación intensiva, prueba B-16.

Tiempos h	Sólidos g/t	Contenido metálico g	Repartición %
0	294,6	310,39	0,0
4:00	-	-	-
8:00	3,3	3,48	98,9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7

Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-17.

Tiempos	Código	Sol. LIX oro	Oro Soluciones	Recuperación Oro
		mg/ℓ	g	%
0	ILR - B-16 SOL INICIO (8-09-17)	0,00	0,00	0,00
2:00	ILR - B-16 SOL 2 HRS (8-09-17)	88,10	295,40	71,62
4:00	ILR - B-16 SOL 4 HRS (8-09-17)	93,40	313,20	75,93
8:00	ILR - B-16 SOL FINAL (8-09-17)	111,10	372,50	90,32

Fuente: Elaboración propia.

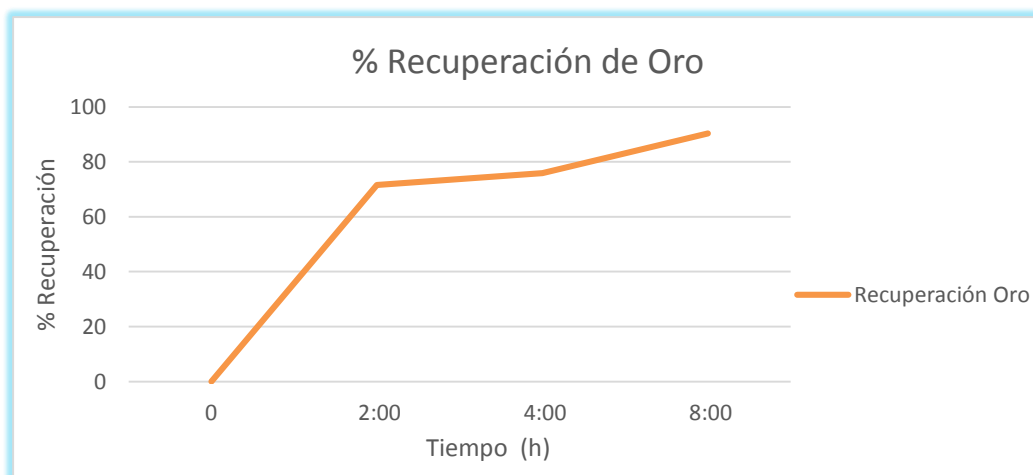


Figura 11. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-17.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

Balance en cianuración de oro en 8 horas en lixiviación, prueba B-17.

	Kg	m ³	Contenido Au			Repartición %	Recuperación (%)
			Au mg/ℓ	Au g/t	Au g		
Solución LIX	-	0,0035	111,10	-	372,50	90,32	
Solución Lavado	-	1,51	19,10	-	29,62	7,18	97,50
Ripio	1030,80		-	10	3,00	2,50	
Total en Oro					266,80		
Cabeza Calculada "BALANCE"				253,30			
Cabeza Analizada "LABORATORIO"				294,60			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9

Ley en sólidos a diferentes tiempos de lixiviación intensiva, prueba B-17.

Tiempos	Sólidos	Contenido metálico	Repartición
H	g/t	G	%
0	359,4	370,47	0,0
4:00	3,9	-	-
8:00	10,0	10,31	97,2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10

Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-18.

Tiempos	Código	Sol. LIX oro	Oro Soluciones	Recuperación Oro
		mg/l	g	%
0	ILR - B-16 SOL INICIO (8-09-17)	33,60	107,00	27,26
2:00	ILR - B-16 SOL 2 HRS (8-09-17)	104,70	333,50	84,95
4:00	ILR - B-16 SOL 4 HRS (8-09-17)	115,30	367,20	93,55
8:00	ILR - B-16 SOL FINAL (8-09-17)	112,90	359,60	91,60

Fuente: Elaboración propia.

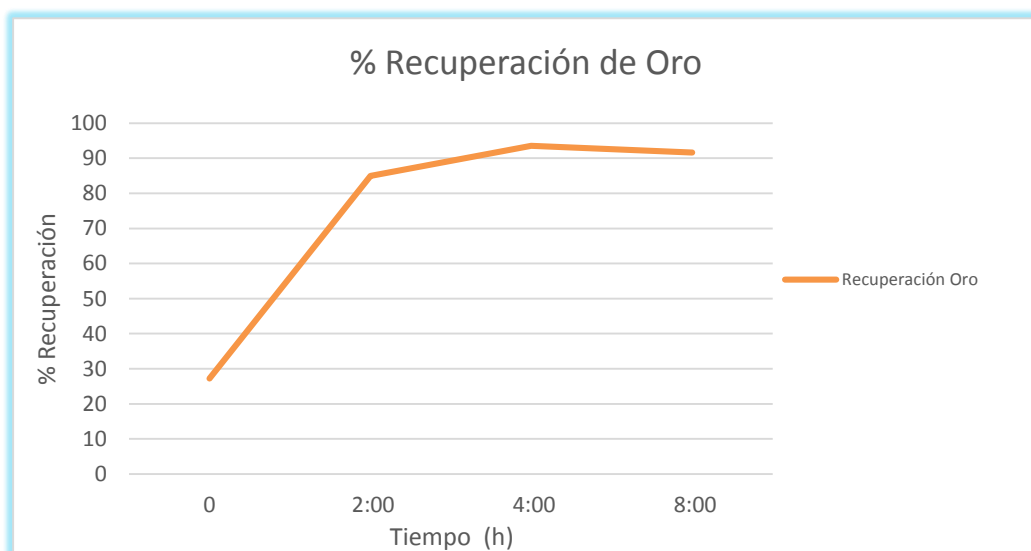


Figura 12. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-18.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11

Balance en cianuración de oro en 8 horas en lixiviación, prueba B-18.

	Kg	m ³	Contenido Au			Repartición %	Recuperación (%)
			Au mg/ℓ	Au g/t	Au g		
Solución LIX	-	3,19	112,90	-	359,60	91,60	
Solución Lavado	-	1,63	17,50	-	28,60	7,29	98,88
Ripio	1042,80		-	4,20	4,40	1,12	
Total en Oro					392,60		
Cabeza Calculada "BALANCE"				376,50			
Cabeza Analizada "LABORATORIO"				509,90			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12

Ley en sólidos a diferentes tiempos de lixiviación intensiva, prueba B-18.

Tiempos h	Sólidos g/t	Contenido metálico g	Repartición %
0	509,90	531,72	0,00
4:00	2,10	-	-
8:00	4,20	4,38	99,20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13

Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-19.

Tiempos	Código	Sol. LIX oro mg/ℓ	Oro Soluciones g	Recuperación Oro %
0	ILR - B-16 SOL INICIO (8-09-17)	35,90	150,20	24,40
2:00	ILR - B-16 SOL 2 HRS (8-09-17)	113,20	473,80	76,90
4:00	ILR - B-16 SOL 4 HRS (8-09-17)	120,80	505,60	82,09
8:00	ILR - B-16 SOL FINAL (8-09-17)	135,90	568,80	92,35

Fuente: Elaboración propia.

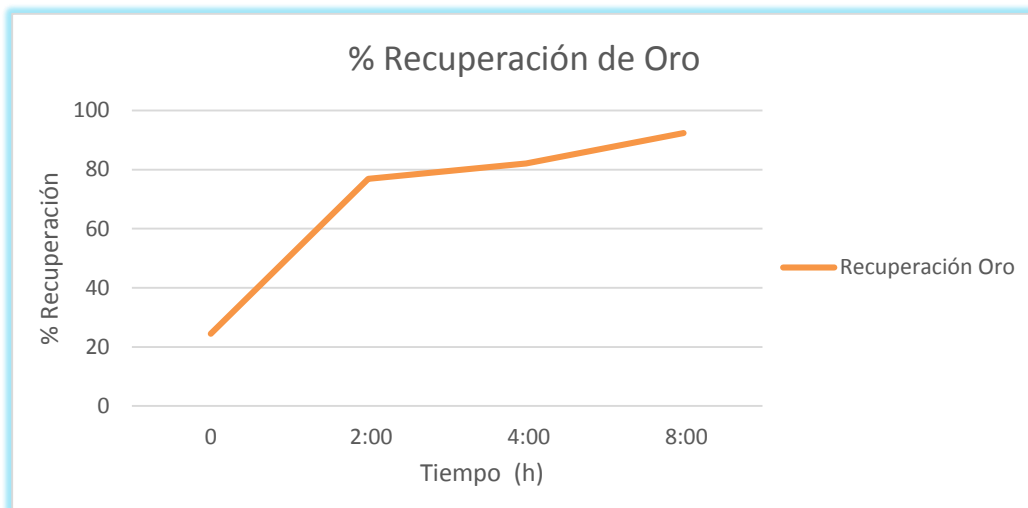


Figura 13. Recuperación de oro a diferentes tiempos de lixiviación, prueba B-19.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14
Balance de cianuración de oro en 8 horas de lixiviación, prueba B-19.

	Contenido Au					Repartición %	Recuperación (%)
	Kg	m ³	Au mg/ℓ	Au g/t	Au g		
Solución LIX	-	4,19	135,90	-	568,76	92,35	
Solución Lavado	-	1,63	25,70	-	42,01	6,82	99,17
Ripio	1041,60		-	4,90	5,10	0,83	
Total en Oro					615,90		
Cabeza Calculada "BALANCE"					591,30		
Cabeza Analizada "LABORATORIO"					581,90		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15
Ley en sólidos a diferentes tiempos de lixiviación intensiva, prueba B-19.

Tiempos h	Sólidos g/t	Contenido metálico g	Repartición %
0	581,90	606,11	0,0
4:00	28,10	-	-
8:00	4,90	5,10	99,20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16
Recuperación de oro en sólidos y líquidos
Recuperación

N° Batch	% Sólidos	% Líquidos
16	98,88	98,70
17	97,22	97,50
18	99,18	98,91
19	99,16	99,08
20	98,76	98,37
21	94,55	94,57
22	98,87	99,28
23	96,61	97,29
24	94,69	96,14
25	98,39	98,35
26	96,21	95,43
27	98,28	98,28
28	97,69	98,28

Fuente: Elaboración propia.

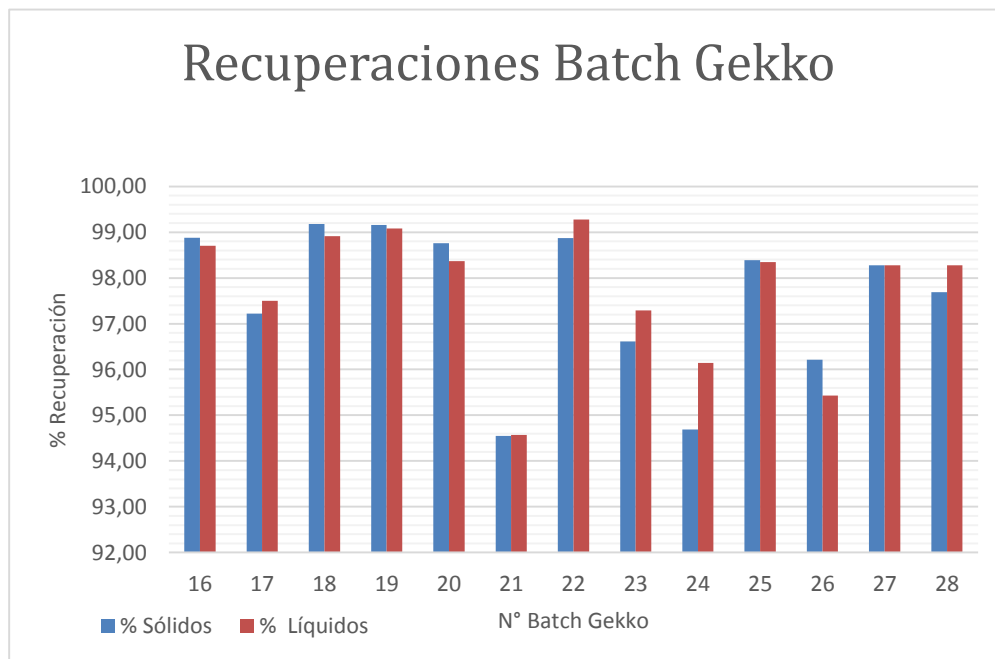


Figura 14. Recuperación en el equipo Gekko.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Recuperación de la etapa de Electrodeposición.

En la etapa de EW, se tiene una celda en operación que funciona con un rectificador de 150 A, en operación se puede mantener un voltaje de 3 voltios, con un amperaje de 70 amperios, lo que nos obliga a tener mayor tiempo de retención de la solución el circuito de electrólisis.

Tabla 17

Balance metalúrgico en la etapa de electrodeposición, prueba B-16.

	Balance en EE -WW		contenido Au Repartición Recuperación		
	m ³	[Au] g/m ³	g	%	%
Volumen de solución B-16	0,46	-	-	-	
Solución de inicio EE WW	0,46	75,60	34,85	100,00	95,37
Solución pobre EEWW	0,46	3,50	1,61	4,63	
Total de oro en cátodo			33,24		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18

Balance metalúrgico en la etapa de electrodeposición, prueba B-17.

	Balance en EE -WW		contenido Au Repartición Recuperación		
	m ³	[Au] g/m ³	g	%	%
Volumen de solución B-17	0,46	-	-	-	
Solución de inicio EE WW	0,46	71,10	32,78	100,00	96,48
Solución pobre EEWW	0,46	2,50	1,15	3,52	
Total de oro en cátodo			31,63		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19

Balance metalúrgico en la etapa de electrodeposición, prueba B-18.

	Balance en EE -WW		contenido Au Repartición Recuperación		
	m ³	[Au] g/m ³	g	%	%
Volumen de solución B-18	3,19	-	-	-	
Solución de inicio EE WW	3,19	111,10	354,38	100,00	97,12
Solución pobre EEWW	3,19	3,20	10,21	2,88	
Total de oro en cátodo			344,17		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20

Balance metalúrgico en la etapa de electrodeposición, prueba B-19.

	Balance en EE -WW		contenido Au Repartición Recuperación		
	m ³	[Au] g/m ³	g	%	%
Volumen de solución B-19	2,93	-	-	-	
Solución de inicio EE WW	2,93	112,90	331,31	100,00	96,01
Solución pobre EEWW	2,93	4,50	13,21	3,99	
Total de oro en cátodo			318,10		

Fuente: Elaboración propia.

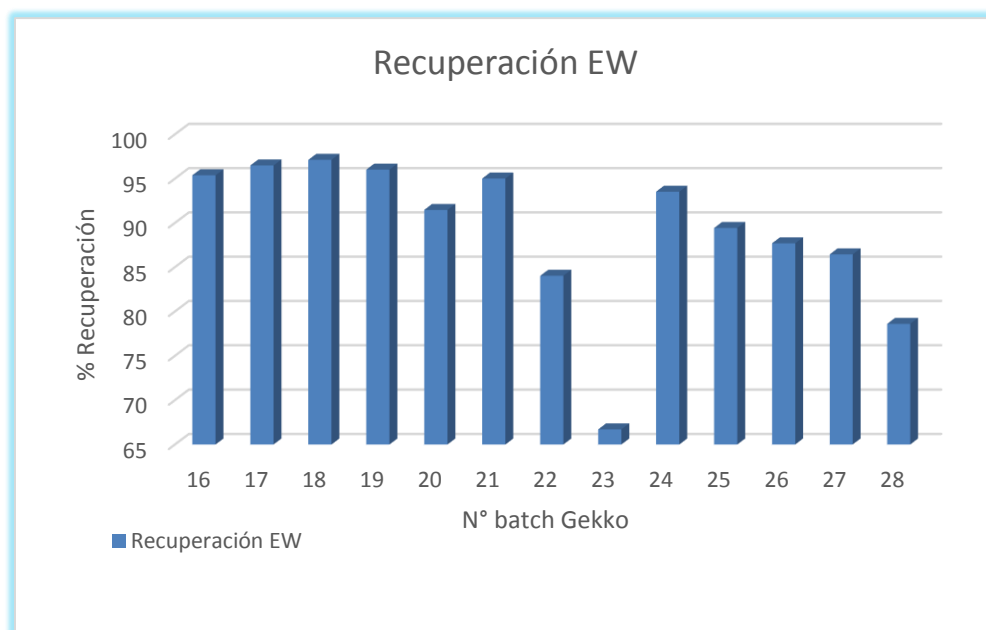


Figura 15. Recuperación del proceso de electrodeposición.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21
Recuperación del proceso de electrodeposición de oro.

Recuperación EW		
N° Batch	%	g Au/Producido
16	95,37	33,24
17	96,48	31,63
18	97,12	344,17
19	96,01	318,10
20	91,46	507,49
21	95,01	234,76
22	84,02	194,80
23	66,70	200,63
24	93,52	225,37
25	89,42	231,89
26	87,69	213,58
27	86,44	195,21
28	78,60	227,21
Total (gr Au)		2.958,09

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Consumo de cianuro.

De acuerdo a los ensayos realizados por la empresa MINETEC DO BRASIL – GEKKO, establece que la dosificación de cianuro para los concentrados de gravimetría, oscila entre 45 a 50 Kg por tonelada de mineral.

Siendo el cianuro una sustancia que disuelve el oro en agua, se muestra los consumos en la tabla siguiente:

Tabla 22
Consumo de cianuro.

N° Batch	kg CN-/Batch	kg CN-/t
16	65,00	54,17
17	66,70	55,58
18	64,50	53,75
19	70,00	58,33
20	34,00	28,33
21	26,00	21,67
22	30,00	25,00
23	38,00	31,67
24	44,00	36,67
25	42,00	35,00
26	32,00	26,67
27	48,00	40,00
28	46,00	38,33
	Promedio	38,86

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Consumo de oxígeno

De acuerdo a la recomendación de la empresa Gekko, determina usar una concentración de 20 ppm de oxígeno disuelto, de momento el equipo no cuenta con un sensor que nos permita determinar la concentración de oxígeno, además de acuerdo a la programación del software se abre la llave de ingreso de oxígeno por dos horas continuas (consumiendo dos botellones), y después de las dos horas la válvula se abre y cierra intermitentemente por las siguientes 6 horas, abriendo cada 5 s y cerrando por 40 s (haciendo un consumo de 3 botellones más), para

cada batch se usan 5 botellones, a una presión de 172 369 Pa (25 psi) de salida, por un tiempo total de 8 horas de lixiviación.

4.5. Determinación del costo de procesamiento

En función de los consumos de reactivos, y demás costos incurridos en el procesamiento de minerales de alta ley por medio de reactor de lixiviación intensiva Gekko y el circuito de electrodeposición se estima que el costo de procesamiento es de 87,79 dólares por onza de oro producida.

Tabla 23
Costo de lixiviación IRL-150 Gekko

Costo de lixiviación - IRL - 150 Gekko			
Descripción	Consumo (kg/Batch)	Costo US\$/kg	SUB TOTAL
Cianuro	38,86	5,50	213,7
NaOH	2,00	5,76	11,5
Oxígeno (botellones)	6,00	13,50	81
Otros Reactivos de Refinación y Fusión		Monto global	50
Análisis Químico	10,00	7,77	77,7
SUB TOTAL (US\$/Batch)			434
Costos de Producción		Precio Unit (US\$)	US\$/ Batch
Costo de Energía		Monto global	50,00
Aceites y lubricantes		Monto global	5,00
Elementos para el taller		Monto global	10,00
Mano de Obra Directa (3 Operarios)		650	32,50
Mano de Obra Directa (Mecánico)		650	10,83
Mano de Obra Indirecta (2 Supervisores)		1500	50,00
Costo Varios (Global)		Monto global	50,00
TOTAL			208,33
Total de Operativo (US\$/Batch)			642,27
Total de Operativo (US\$/Oz Oro producido)			87,79

Fuente: Elaboración propia.

4.6. Ventajas específicas del reactor Gekko – batch

- Lixivia oro fino y grueso.
- Ingeniería específica para la prevención del atrapamiento de partículas de oro en el cuerpo del tambor.
- Sistema simplificado con baja cantidad de componentes: 1 tambor, 1 bomba, 1 sumidero, 2 tanques.
- Bajos costos operativos y cero requerimiento de agentes químicos lixiviantes.
- Baja potencia instalada (menos de 10 kW)
- Dedicado paso de clarificación.
- Solución rica altamente apropiada para la recuperación por electro deposición.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los trabajos realizados en la planta de procesamiento Gekko de la empresa "EAGLE CREST EXPLORATION BOLIVIA", se logró alcanzar: Altas eficiencias en el reactor de cianuración intensiva Gekko, que están en el orden del 94 % a 98 % de recuperación.

Para concentrados de alta ley y elevadas concentraciones de oxígeno, el consumo promedio de cianuro es de 38 a 40 kg/t concentrado.

Se determinó que el costo de procesamiento por medio de este proceso es de 88 dólares americanos por onza de oro producida.

De acuerdo a nuestra evaluación se debe mejorar la etapa de manejo de soluciones y electrodeposición.

Sin embargo este reactor IRL-150 Gekko, es muy práctico por su forma compacta, bajo consumo de energía, bajo costo en montaje e instalación, bajo costo de mantenimiento, lo que permite que empresa pequeñas puedan acceder a un proceso que les permita metalizar el oro de sus concentrados que obtienen por gravimetría o flotación.

Además se demostró que los metalurgistas de ESME-UNJBG estamos a la vanguardia de la tecnología y podemos levantar operaciones en diferentes circuitos o equipos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar pruebas para bajar el consumo de cianuro y evaluar si es posible obtener la misma eficiencia si se logra trabajar con una concentración menor de fuerza de cianuro, es decir actualmente se trabaja con una fuerza de 20 gpl, evaluar si se logra mantener la recuperación y tiempo a una concentración de 18 o 16 gpl en fuerza de cianuro.

Poner en marcha la segunda celda electrolítica para poder trabajarla en paralelo o serie de esta manera bajar el tiempo de electrodeposición, actualmente el tiempo que se demora en bajar la concentración de oro de la solución rica es de 18 horas; la solución rica tiene una concentración inicial de 75 a 120 g/m³ y sale del circuito hacia el tanque de solución pobre con una concentración de 3 a 5 g/m³.

Capacitar al personal técnico y de apoyo para que puedan responder de una mejor manera ante cualquier eventualidad que se presente en el proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Habashi, Fathi (1993). *Métallurgie extractive*. Québec.

Huachaca C., Jaime E. (2017). *Evaluación y alternativa de recuperación de oro aluvial en la cooperativa minera San Antonio Limitada Ananea-Puno*. Tacna.

Linares G., Nataniel (2001). *Procesamiento de minerales de oro y plata*. Tacna.

Machaca H., Eddy R. (2014). *Investigación para la optimización de la recuperación de oro y plata por el proceso de cianuración intensiva en la planta Antapite*. Arequipa.

Manual de entrenamiento Reactor IRL-150 “GEKKO - 2016.

Mihovilovic, Domic (2001). *Hidrometalurgia*. Santiago.

Missari Chuquipoma, F. (2010). *Metalurgia del oro*. Perú.

Reporte Interno del Departamento Operaciones en Lixiviación – 2017
“Reportes de Operaciones de los procesos realizados”.

Reporte Interno del Departamento de laboratorio Químico – 2017
“Reportes Químicos de los procesos realizados”.

Rosenqvist, Terkel (2004). *Principles of Extractive Metallurgy*.

Valdivia Infantas, Zoilo (1998). *Metalurgia del oro*. Tacna.

Vargas Gallardo, Juan (2007). *Metalurgia del oro y la plata*. Perú.

Villamahua Villamahua, Jhon Cristoforo (2015). *Estudio del proceso de lixiviación intensiva en los concentrados auríferos de la planta de tratamiento metalúrgico Maquicer S.A. ubicada en el distrito minero San Gerardo Cantón Camilo Ponce Enriquez provincia del Azuay*. Ecuador.

ANEXOS
FOTOS DE LAS PRUEBAS



Figura 16. Vista de planta Minera Eagleeast.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 17. Vista de planta de circuitos gravimétricos y de flotación.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 18. Disposición de banco de concentradores gravimétricos ICON.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 19. Disposición de banco de celdas de flotación.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 20. Disposición de tanques de agua y cianuro de sodio.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 21. Disposición de tanques de oxígeno.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 22. Conexiones y controles en la entrada del Equipo Gekko ILR 150.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Entrada de oxígeno y pulpa al equipo Gekko ILR 150 proveniente de concentradores gravimétricos.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Entrada de agua al tambor del equipo Gekko ILR 150.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 25. Tambor de equipo Gekko.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 26. Vista frontal del tambor de equipo Gekko.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 27. Vista frontal de la tolva de alimentación al ingreso del equipo Gekko.
Fuente: Elaboración propia.

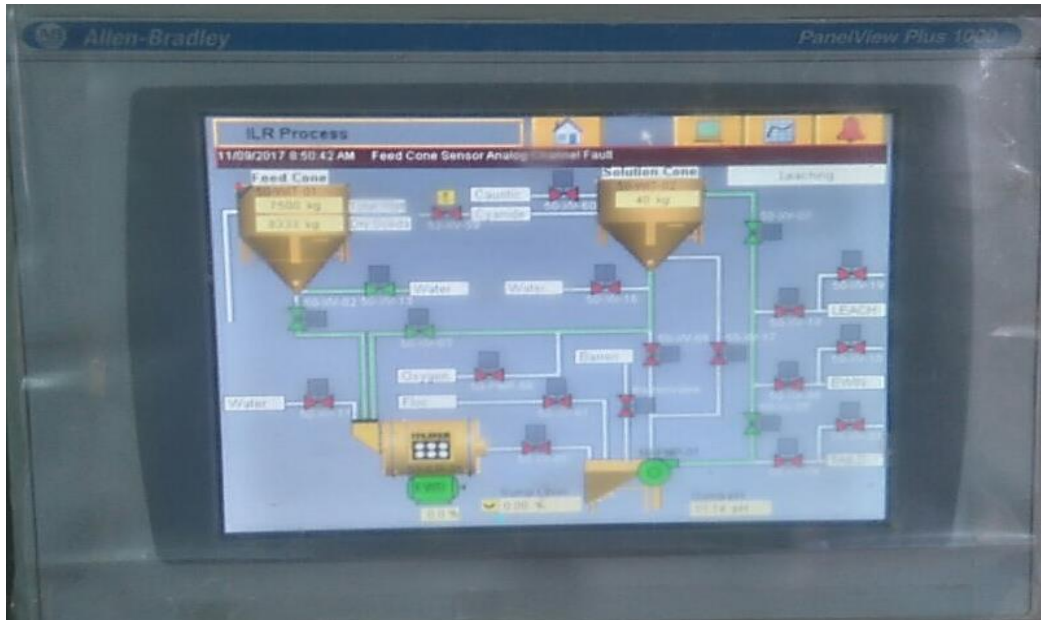


Figura 28. Vista frontal del panel view del equipo Gekko.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 29. Vista frontal del tablero de control del equipo Gekko.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 30. Fuente de poder de la celda de electrodeposición.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 31. Celda de electrodeposición de oro.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 32. Disposición de cátodos y ánodos en celda de electrodeposición de oro.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 33. Cosecha de cátodos de oro.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 34. Horno de fusión de oro.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 35. Obtención de lingote de oro.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 36. Peso obtenido de lingote de oro.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 37. Obtención de oro refinado.
Fuente: Elaboración propia.