

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA MINERA Y METALÚRGICA



**CIANURACIÓN DE CONCENTRADOS PIRROTÍICOS
AURIFEROS CON ETAPA DE PRE-TRATAMIENTO DE
OXIDACIÓN CON AIRE**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

ELABORADO POR

ANTONIO JOSÉ YAMASHIRO BERMEJO

ASESOR

Ing. DAVID PEDRO MARTINEZ AGUILAR

LIMA – PERU

2012

RESUMEN

Los minerales pirrotíticos con contenido de oro se consideran un mineral refractario ya que no se adecua a los procesos convencionales de extracción de oro, para lo cual, en el presente trabajo de investigación se realizaron diferentes pruebas utilizando el método de pre-tratamiento de oxidación con suministro de aire.

La conclusión más importante indica que los concentrados deben tener un proceso químico de oxidación previo a la cianuración; la oxidación debe realizarse hasta la total conversión de las propiedades del mineral haciéndolo dócil al proceso de cianuración, generando un aumento en la recuperación de oro y disminuyendo el consumo de reactivos. Luego de la oxidación, los concentrados son cianurados, recuperando el oro disuelto mediante los procesos de Carbón en Pulpa (CIP) ó Merrill Crowe.

Se realizó diferentes pruebas de preoxidación como la convencional el cual se realiza con cal (medio alcalino) y se realizó pruebas piloto que consistió en oxidar la pulpa sin cal (medio ácido) donde se observa que también se produce un material oxidado. El proceso se completa con una etapa de lavado y/o filtración para lograr evacuar la solución con altos niveles de Hierro disueltos en la solución.

La recuperación de oro aplicando la preoxidación en medio ácido y medio alcalino son similares, la diferencia radica básicamente en los consumos de reactivos.

En base a estos resultados se plantea un esquema de tratamiento para los minerales pirrotíticos con sus principales áreas de procesamiento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	11
CAPITULO I: FUNDAMENTO TEÓRICO	15
1.0 BASE TEÓRICA.....	15
1.1 Comportamiento de los minerales de Sulfuros de Fierro en presencia de cianuro	16
1.1.1 Comportamiento del Fierro en presencia de cianuro.....	16
1.1.2 Comportamiento de la pirrotíta en presencia de cianuro	18
1.2 Aplicación del pre-tratamiento de oxidación	21
1.2.1 Reacciones Químicas de oxidación de Fierro	22
1.2.2 Reacciones Químicas de oxidación de Azufre	24
1.2.3 Lixiviación de oro con tiosulfato	27
1.3 Utilización de sales de Plomo	28
1.4 Química de la cianuración del oro.....	28
1.5 Antecedentes	30
1.5.1 Tratamiento Metalúrgico de Pirrotítas que contienen oro (Parra. H; Miranda, R, 2010)	30
1.5.2 Pruebas de Laboratorio de cianuración intensiva (Gekko Systems, 2010)	31

CAPITULO 2: METODOLOGÍA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	34
2.0 TRABAJO EXPERIMENTAL.....	34
2.1 Planta Piloto.....	34
2.2 Origen de concentrado.....	35
2.3 Técnicas de recolección de datos.....	35
2.4 Caracterización mineralógica de los concentrados.....	35
2.4.1 Concentrado de Flotación.....	36
2.4.2 Concentrado Gravimétrico.....	39
2.5 Pruebas de cianuración con etapas previas de oxidación con y sin cal.....	43
2.5.1 Pruebas a nivel de Laboratorio con adición de Nitrato de Plomo.....	43
2.5.2 Prueba Piloto de cianuración directa de los concentrados de Flotación.....	48
2.5.3 Prueba piloto de cianuración de concentrados de flotación con etapa previa de oxidación en medio alcalino.....	52
2.5.4 Prueba piloto de cianuración de concentrados de flotación con etapa previa de oxidación en medio ácido.....	60
2.5.5 Prueba piloto de determinación de cantidad de oxígeno requerido en la etapa para la oxidación de los concentrados de flotación.....	69
2.5.6 Pruebas de suministro y distribución de aire en dos tanques agitadores 20'Øx20' y uno de 17'Øx17' para la oxidación y cianuración de los concentrados de flotación.....	73

2.5.7 Prueba piloto de cianuración de concentrados gravimétricos con etapa previa de oxidación	79
CAPITULO III: EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	85
3.1 BALANCE DE MATERIA	85
3.1.1 Concentrado de Flotación	85
3.1.2 Concentrado de Gravimétrico	87
3.1.3 Flow Sheet propuesto para los tratamientos de concentrados pirrotíticos	87
3.2 COSTOS DE INVERSIÓN	89
3.2.1 Costos de inversión de los principales Equipos de Planta.....	89
3.2.2 Costos de inversión de Equipos de laboratorio	91
3.3 COSTO DE TRATAMIENTO	92
3.4 COSTO DE PRODUCCIÓN.....	92
3.5 FACTIBILIDAD DEL PROYECTO	93
3.5.1 Concentrado de Flotación	93
3.5.2 Concentrado Gravimétrico	93
3.5.3 Producción total por mes	93
3.5.4 Costo Total	94
CONCLUSIONES.....	96

BIBLIOGRAFÍA.....	106
--------------------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Resultados de la cianuración del mineral de cabeza.....	31
Tabla 1.2: Pruebas de cianuración del concentrado de flotación	31
Tabla 1.3: Condiciones de la Cianuración intensiva.....	32
Tabla 1.4: Resultados de la Cianuración intensiva.....	32
Tabla 2.1: Abreviaturas de minerales presentes	36
Tabla 2.2: Condiciones Metalúrgicas de oxidación	45
Tabla 2.3: Condiciones Metalúrgicas cianuración	45
Tabla 2.4: Dosificación de Nitrato de Plomo en la Etapa de oxidación.....	46
Tabla 2.5: Ratio optimo de dosificación de Nitrato de Plomo	47
Tabla 2.6: Condiciones metalúrgicas de remolienda.....	50
Tabla 2.7: Condiciones Metalúrgicas de la cianuración.....	50
Tabla 2.8: Leyes de oro y fierro en los tanques	51
Tabla 2.9: Consumo total de reactivos.....	51
Tabla 2.10: Condiciones de la oxidación con cal	55
Tabla 2.11: Condiciones de la cianuración.....	55
Tabla 2.12: Monitoreo de la etapa de oxidación con cal.....	56
Tabla 2.13: Monitoreo de la etapa de cianuración.....	57
Tabla 2.14: Consumo de reactivos	58
Tabla 2.15: Comportamiento de las especies mineralógicas por horas durante la oxidación con cal	59
Tabla 2.16: Condiciones de la oxidación en medio ácido.....	63
Tabla 2.17: Condiciones de filtración de las pruebas con oxidación en medio ácido.....	63
Tabla 2.18: Condiciones de lavado de las pruebas con oxidación en medio ácido ..	64

Tabla 2.19: Condiciones de Cianuración	64
Tabla 2.20: Monitoreo de etapa de oxidación-filtración	65
Tabla 2.21: Monitoreo de etapa de oxidación-lavado	65
Tabla 2.22: Monitoreo de etapa de oxidación-lavado-filtración.....	66
Tabla 2.23: Monitoreo de cianuración con etapa previa de oxidación-filtración	67
Tabla 2.24: Monitoreo de cianuración con etapa previa de oxidación-Lavado	68
Tabla 2.25: Monitoreo de cianuración con etapa previa oxidación-filtración-lavado .	68
Tabla 2.26: Consumo de reactivos con oxidación en medio ácido	69
Tabla 2.27: Condiciones de la oxidación sin cal.....	72
Tabla 2.28: Condiciones de cianuración	72
Tabla 2.29: Balance de oxígeno requerido.....	73
Tabla 2.30: Condiciones Metalúrgicas de la oxidación.....	81
Tabla 2.31: Condiciones Metalúrgicas de la cianuración.....	81
Tabla 2.32: Monitoreo de la etapa de oxidación del concentrado gravimétrico	82
Tabla 2.33: Monitoreo de la etapa de cianuración.....	83
Tabla 2.34: Consumo de reactivos del concentrado gravimétrico	84
Tabla 3.1: Costos de inversión e instalación de equipos de Planta.....	90
Tabla 3.2: Costos de equipos e instalación de Laboratorio químico-metalúrgico	91
Tabla 3.3: Inversión total de Planta y Laboratorio	91
Tabla 3.4: Costos de tratamiento de concentrados pirrotílicos	92
Tabla 3.5: Costos de producción de concentrados pirrotílicos	92
Tabla 3.6: Balance metalúrgico de concentrado de flotación	93
Tabla 3.7: Balance metalúrgico de concentrado gravimétrico	93
Tabla 3.8: Producción Total de oro	93
Tabla 3.9: Costo total de la inversión	94
Tabla 3.10: Costo total Tratamiento.....	94

Tabla 3.11: Utilidades	95
Tabla 4.1: Resumen de consumo de reactivos	101
Tabla 4.2: Balance de oxígeno suministrado por la compresora ZE-4-I-200	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama Eh-pH del sistema Fe-CN-H ₂ O a 25 °C (Marsden y House, 2006)	17
Figura 1.2: Diagrama Eh-pH del sistema Fe-S-CN-H ₂ O a 25 °C (Srithammavut, 2008)	20
Figura 1.3: Diagrama Eh-pH para el sistema Fe-S-H ₂ O a 25 °C (Marsden, House, 2006)	22
Figura 1.4: Diagrama Eh-pH del sistema S-H ₂ O a 25°C. (Marsden, House, 2006)	25
Figura 1.5: Diagrama Eh-pH del sistema S-H ₂ O a 25°C con el ión de SO ₄ ²⁻ omitido. (Marsden, House, 2006)	26
Figura 1.6: Diagrama Eh-pH del sistema de Au - CN - H ₂ O, a 25 °C (Zhang S. 2004)	30
Figura 2.1: Malla +200	36
Figura 2.2: Malla +200	37
Figura 2.3: Malla +200	37
Figura 2.4: Malla -200	38
Figura 2.5: Malla -200	38
Figura 2.6: Malla -200	39
Figura 2.7: Malla +200	40
Figura 2.8: Malla +200	40
Figura 2.9: Malla +200	41
Figura 2.10: Malla -200	41
Figura 2.11: Malla -200	42
Figura 2.12: Malla -200	42

Figura 2.13: Esquema de pruebas con Nitrato de Plomo	44
Figura 2.14: Dosificación de Nitrato de Plomo en la Etapa de Oxidación	46
Figura 2.15: Ratio óptimo de consumo de Nitrato de Plomo	47
Figura 2.16: Diagrama de Prueba Piloto de cianuración directa.....	49
Figura 2.17: Cinética de recuperación de oro	52
Figura 2.18: Diagrama de prueba piloto de cianuración de Concentrados de Flotación con pre-oxidación en medio alcalino.....	54
Figura 2.19: Parámetros de oxidación con cal	56
Figura 2.20: Cinética de recuperación de oro	58
Figura 2.21: Comportamiento de las especies mineralógicas durante la oxidación con cal.....	59
Figura 2.22: Diagrama de proceso de Prueba Piloto con oxidación en medio ácido con etapas de oxidación - filtración y/o lavado.....	61
Figura 2.23: Diagrama de proceso de Prueba Piloto con oxidación en medio ácido con lavado	62
Figura 2.24: Cinética de Recuperación de oro	67
Figura 2.25: Esquema del proceso piloto para la determinación de la cantidad de oxígeno.....	71
Figura 2.26: Esquema General de suministro de aire de mina a Planta.....	75
Figura 2.27: Esquema de distribución de aire utilizando tubería de 6"Ø	76
Figura 2.28: Esquema de distribución de aire utilizando tubería de 4" Ø	77
Figura 2.29: Esquema de distribución de aire utilizando tuberías de 3"Ø y 2"Ø	78
Figura 2.30: Esquema propuesto de suministro de aire	79
Figura 2.31: Esquema del proceso piloto de tratamiento de concentrado gravimétrico	80
Figura 2.32: Parámetros de oxidación	82

Figura 2.33: Cinética de Recuperación de oro	84
Figura 3.1: Balance de tratamiento de los concentrados de Flotación	86
Figura 3.2: Balance de tratamiento de los concentrados gravimétricos.....	87
Figura 3.3: Flow Sheet de Planta oxidación y cianuración de concentrados pirrotíticos.....	88

INTRODUCCIÓN

Los bajos niveles de extracción del oro se deben a la refractariedad de los minerales, la influencia de la presencia de pirita, pirrotita y arsenopirita, retardan e inhiben la disolución del oro metálico a solución, estas logran atenuarse o reducirse mediante otros tratamientos complementarios necesarios al proceso de cianuración, los que pueden ser ciclos de tostación, pre-aireación ó preoxidación, lixivitaciones acuosas con soluciones ácidas o básicas bajo condiciones controladas de presión, temperatura y mediante la lixiviación bacteriana.

La mayoría de las veces, la cianuración de estos minerales requiere largos periodos de lixiviación y desafortunadamente producen bajas recuperaciones de oro.

Las reacciones químicas entre los minerales y los compuestos utilizados en las soluciones de lixiviación pueden reaccionar con el cianuro ocasionando la disminución de la eficiencia de la lixiviación.

Otras especies como Fe^{2+} , S^{2-} y arseniatos tienden a consumir el oxígeno vital para la disolución del metal con cianuro y tiosulfato (Iglesias, Palencia y Carranza, 1997). Durante las operaciones metalúrgicas, la formación de productos insolubles o la ocurrencia de fenómenos de pasivación (formación de óxidos de hierro) también pueden ser responsables de las bajas recuperaciones.

En los últimos años se han desarrollado técnicas de pre-tratamiento económico y

viable para la recuperación de valores de oro, ya que hay un interés creciente por la explotación y procesamiento de este tipo de materia prima.

Con el fin de superar el carácter refractario se utilizan técnicas de pre-tratamiento que hacen que el oro pueda ser recuperado.

La ruta tradicional para tratar este tipo de materia prima está en tostarlo para la oxidación de los sulfuros antes de la lixiviación.

La tostación es el proceso más popular para el tratamiento de minerales de sulfuros refractarios (Costa, 1997). El proceso consiste en la transformación de sulfuros de hierro de alta porosidad a óxidos de hierro. A pesar de ser un método bien establecido, es caro e indeseable teniendo en cuenta las normas presentes que protegen el medio ambiente por la emisión de gases tóxicos como SO_2 y As_2O_3 . Por lo tanto, los problemas de contaminación causados han estimulado la investigación de nuevos tratamientos hidrometalúrgicos basado en la oxidación química y biológica. Estos nuevos métodos incluyen la oxidación a alta presión (autoclaves), oxidación a baja presión (inyección de aire u oxígeno) y la bio-oxidación (Chiacchiarini, De la Fuente y Donati 2000).

En los últimos años hay una tendencia creciente en la industria para el uso de la oxidación a alta presión en lugar del método de tostación tradicional por dos razones: Ambientales y para aumentar la recuperación de oro. Se trata de un pre-tratamiento altamente agresivo de los minerales a altas temperaturas (100-210 °C) y presión (700-2200 KPa) en atmósfera oxidante, permitiendo la oxidación de los sulfuros. El residuo sólido oxidado es generalmente lixiviado con cianuro. El proceso está muy influido por el pH y la temperatura, la alta acidez favorece la disolución del sulfuro, mientras que la temperatura puede causar la formación de azufre elemental que puede afectar a la extracción de oro negativamente. A pesar de su alta eficiencia y de la excelente cinética para su aplicación, esta se ve limitado

por los costos operativos e inversión (Costa 1997, Iglesias 1993).

La oxidación bacteriana es un proceso biológico en el que una bacteria (*Thiobacillus ferrooxidans*) se utiliza para promover la descomposición química de la matriz del sulfuro, pero a pesar del gran número de plantas Biox en funcionamiento y ambientalmente muy atractivo (Chiacchiarini, De la Fuente, y Donati, 2000), presenta algunos inconvenientes como una cinética lenta y la gran dependencia del ataque de las bacterias para el tipo de mineral a tratar (Costa 1997).

La pre-oxidación a baja presión se puede realizar en ambientes menos agresivos, se aplica a bajas temperaturas (20-50 °C) y baja presión (5 -20 psi), dentro de un ambiente oxidante. Está altamente influenciado por el contenido de oxígeno disuelto en presencia de agua y el grado de pH.

La justificación de aplicar la pre-oxidación es que incrementa la recuperación del oro y se debe resaltar que el proceso produce ciertas ventajas económicas.

El presente trabajo de investigación, consiste en aplicar la alternativa de la pre-oxidación a los minerales refractarios como etapa previa a la cianuración con la finalidad de desarrollar un esquema de tratamiento de los concentrados pirrotíticos en base a las pruebas de laboratorio y pilotajes realizados.

El objetivo principal es plantear la aplicación del pre-tratamiento de oxidación antes de la cianuración para procesar los concentrados refractarios de naturaleza pirrotítica a nivel industrial.

El objetivo principal, puede desglosarse en otros objetivos parciales:

- Lograr completar la oxidación de los concentrados pirrotíticos al 100% el cual requiere y es requisito imprescindible antes de la etapa de cianuración logrando una recuperación que pueda superar el 90%.
- Disminuir el consumo de reactivos como la cal y cianuro para el beneficio económico del proyecto.
- Introducir las etapas de filtrado y lavado después de obtener una pulpa de flotación oxidada en medio ácido y evacuar la solución obtenida para iniciar un proceso de cianuración libre del líquido cargado de complejos formados en la oxidación que son consumidores de cal y cianuro.
- Determinar el requerimiento de oxígeno (m^3O_2/tms) para completar el proceso de preoxidación.
- Plantear un Esquema de procesamiento para el Tratamiento de los concentrados de naturaleza pirrotítica.
- Estimar el costo de inversión para el Tratamiento de los concentrados pirrotíticos con una aproximación de más o menos de 25%.

La presente investigación tiene como hipótesis que la etapa de pre-oxidación previa a la cianuración, aumentará la recuperación de oro y disminuirá los consumos de reactivos.

CAPITULO I

FUNDAMENTO TEÓRICO

1.0 BASE TEÓRICA

El proceso de oxidación se puede aplicar como tratamiento previo a los minerales ó concentrados sulfurosos para aumentar la extracción de oro mediante técnicas de procesamiento hidrometalúrgico, por lo general de cianuración. Estos materiales se denominan comúnmente "Refractarios", literalmente "difícil de tratar". Cada mineral tiene una composición única de minerales en diferentes asociaciones y por lo tanto individuales de refractariedad que deben considerarse para lograr una óptima extracción de oro.

En el caso de los sulfuros, la oxidación puede ser necesaria para disolver algunos, o todos, los componentes del sulfuro con el fin de exponer los valores de oro y/o para neutralizar sus superficies, evitando el consumo excesivo de reactivos.

Los métodos hidrometalúrgicos de oxidación, posee técnicas simples como la pre-aireación, esta alternativa se presenta atractivo para tratar minerales y concentrados refractarios.

El método de oxidación y el tipo de oxidante utilizado depende de la mineralogía del material que se oxida, el grado de la oxidación, el costo de los equipos, reactivos y las consideraciones ambientales.

Es necesario examinar la química de la oxidación de los sulfuros con contenido de oro para entender las capacidades de las diversas opciones de tratamiento que se discutirán más adelante. En las secciones siguientes, los productos de reacción de la oxidación por lo general han sido expresadas en forma de iones, al no ser un producto sólido, es conocido por ser formado bajo las condiciones existentes en la oxidación. Sin embargo, algunos de los productos iónicos pueden precipitar rápidamente por reacciones, sobre todo en soluciones alcalinas. Además, el comportamiento del azufre elemental formado por algunas reacciones en medio ácido es un aspecto importante en la oxidación de los sulfuros (Marsden y House, 2006).

1.1 Comportamiento de los Sulfuros de Fierro en presencia de cianuro

Es necesario conocer el comportamiento de los sulfuros de hierro en presencia de cianuro para lo cual haremos uso de los diagramas de Pourbaix para explicar que especies se forman.

1.1.1 Comportamiento del Fierro en presencia de cianuro

Además del oro, otros metales y minerales se disuelven en soluciones alcalinas diluidas de cianuro. Estas reacciones pueden consumir cianuro y oxígeno, así como producir una variedad de especies de solución que pueden reducir la eficiencia de la lixiviación de oro y los procesos posteriores de recuperación.

La mayoría de los sulfuros se descomponen muy fácilmente en soluciones en presencia de cianuro para formar iones metálicos, óxidos metálicos, o complejos de cianuro y varias especies que contienen azufre que incluyen tiocianato y tiosulfato.

La reacción general de sulfuro que contiene un catión metálico divalente en presencia de cianuro se da de la siguiente manera:



Los minerales oxidados de hierro que se disuelven producen el ión Fe (II) el cual en presencia de cianuro forma el ferrocianuro $Fe(CN)_6^{4-}$, como se muestra en la Figura 1.1; esto puede ser más oxidado a Fe (III) de cianuro $Fe(CN)_6^{3-}$, dependiendo de las condiciones de la solución, ocasionando que la tasa de oxidación con el oxígeno disuelto sea lento. La región de predominio del Fe (III) es fuertemente dependiente de la concentración de cianuro libre, el pH y con Goethita formada fuera de esta región como se aprecia en la figura 1.1:

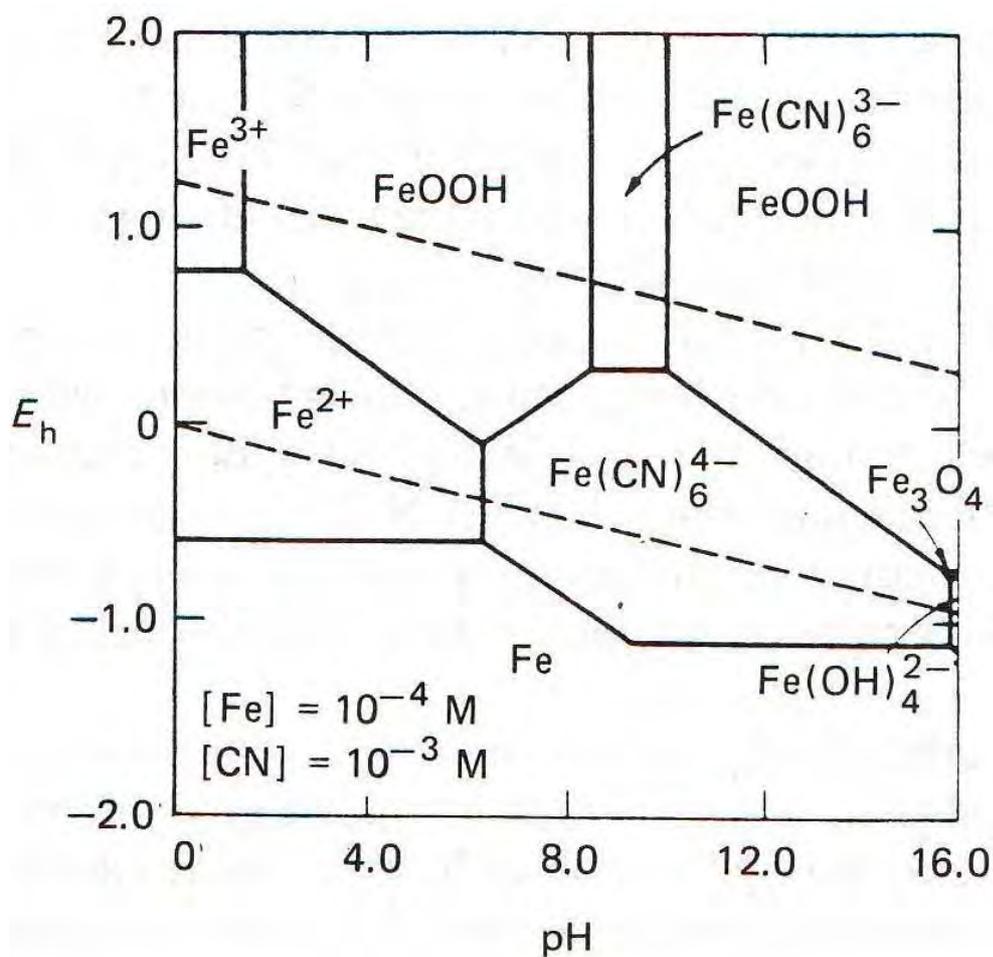


Figura 1.1: Diagrama Eh-pH del sistema Fe-CN-H₂O a 25 °C (Marsden y House, 2006).

1.1.2 Comportamiento de la pirrotita en presencia de cianuro

La pirita, pirrotita, marcasita, calcopirita y arsenopirita son probablemente los principales sulfuros de hierro encontrados en el procesamiento de mineral de oro. En primer lugar, la pirita, arsenopirita y calcopirita se mantienen relativamente estables en soluciones oxigenadas en un amplio rango de pH. La Pirita tiene un alto potencial de reducción estándar, como resultado generalmente no reacciona en las condiciones moderadamente oxidantes típicas de la lixiviación con cianuro.

La pirrotita puede tener la composición Fe_5S_6 a $Fe_{16}S_{17}$, con dos hábitos de cristalografía principal, hexagonal Fe_9S_{10} y monoclinica Fe_7S_8 . La pirrotita cede con facilidad un átomo de azufre, por lo tanto, es generalmente más reactiva que la marcasita o la pirita (Dalley y Allis, 2006).

El orden de la tasa de descomposición de los sulfuros de hierro en presencia de solución de cianuro es generalmente la siguiente (Marsden y House, 2006):

Pirrotita >>> Marcasita > Arsenopirita > Pirita

La pirrotita es el sulfuro de hierro más reactivo en solución alcalina con cianuro, el cual se confirma en la práctica.

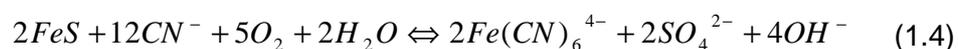
La disolución de los sulfuros en soluciones alcalinas aumenta al aumentar el pH. Los iones de azufre formado son resultado de la descomposición de los sulfuros que se oxidan a tiocianato (CNS^-), en presencia de cianuro, y más lentamente a sulfato. La reacción para formar tiocianato puede describirse de la siguiente manera:



La Pirrotita cede con facilidad un átomo de azufre (S) en presencia de cianuro según la siguiente reacción:



Además la pirrotita produce la reacción de Fe (II) y sulfato, según la reacción siguiente:



Los sulfuros de hierro son mucho más reactivos que los óxidos y silicatos, y la mayoría se descomponen en soluciones alcalinas de cianuro para formar complejos de cianuro de hierro y varias especies de azufre. El diagrama Eh-pH para el sistema Fe-S-CN-H₂O a 25 ° C se muestra en la figura 1.2.

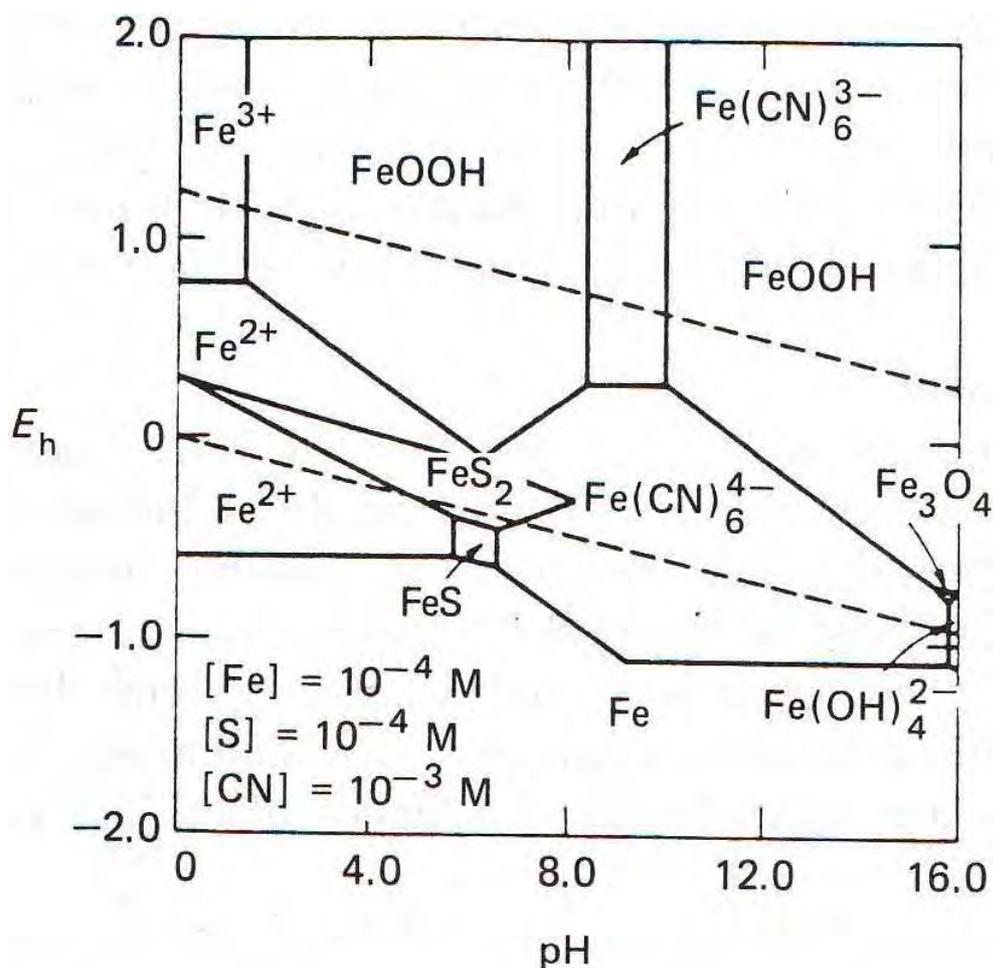


Figura 1.2: Diagrama Eh-pH del sistema Fe-S-CN-H₂O a 25 °C (Srithammavut, 2008).

Las reacciones anteriores indican que la descomposición de los sulfuros de hierro especialmente de la pirrotita, crea dos fuentes de impurezas durante la cianuración: los cationes de metales de Hierro y los compuestos de Azufre. En estas reacciones la disolución de la pirrotita produce la formación complejos de ferrocianuro $Fe(CN)_6^{4-}$ y tiocianato CNS^- , que dan lugar a un agotamiento de oxígeno y cianuro que causa una disminución dramática en la cinética de la lixiviación de oro.

No todos los iones de azufre liberado reaccionan con el cianuro para formar tiocianato, es decir, si el oxígeno está presente, algunos se oxidan a sulfato. Sin

embargo, el ión de azufre también se adsorbe fuertemente sobre la superficie de oro, e inclusive con más fuerza sobre la superficie de la plata. En el oro y la plata, se forman películas de azufre que apaciguan su superficie y disminuye la cinética de lixiviación (Marsden y House 2006).

1.2 Aplicación del pre-tratamiento de oxidación

El oxígeno disuelto en la solución es capaz de oxidar a los sulfuros y ofrece buenas condiciones ambientales de tratamiento. Esto se puede aplicar con un bajo costo, inyectando aire u oxígeno como paso previo antes de la lixiviación con cianuro para oxidar y/o apaciguar las superficies más reactivas, y bajar el consumo de reactivos que consumen los sulfuros de fierro como la pirrotita. Este tratamiento es a menudo capaz de oxidar la superficie de los sulfuros y por lo general aptos para el tratamiento de minerales donde el oro está íntimamente relacionado con los sulfuros.

La oxidación de los sulfuros produce iones ferrosos a iones férricos produciendo un precipitado de hidróxido férrico, ocasionando la neutralización de la superficie de los sulfuros de fierro. Como resultado, el éxito de la preoxidación elimina una parte importante de los consumidores de cianuro y el oxígeno para la posterior etapa de cianuración.

La mayoría de los sulfuros se descomponen muy lentamente en solución acuosa en un amplio rango de pH y bajo las condiciones atmosféricas en la ausencia de un oxidante, y son estables para todos los fines prácticos. Pueden descomponerse rápidamente al aumentar el potencial de oxidación de la solución, lo que puede lograrse mediante la adición de un oxidante adecuado, tal como oxígeno, aire o mediante la elevación de la temperatura y la presión.

Bajo condiciones de Eh – pH pueden ser completamente oxidados en cuestión de

horas, e incluso minutos (Marsden y House, 2006).

1.2.1 Reacciones Químicas de oxidación de Hierro

En el siguiente diagrama Eh-pH para el sistema Fe-S-H₂O, se muestra los rangos de estabilidad de los principales sulfuros de hierro.

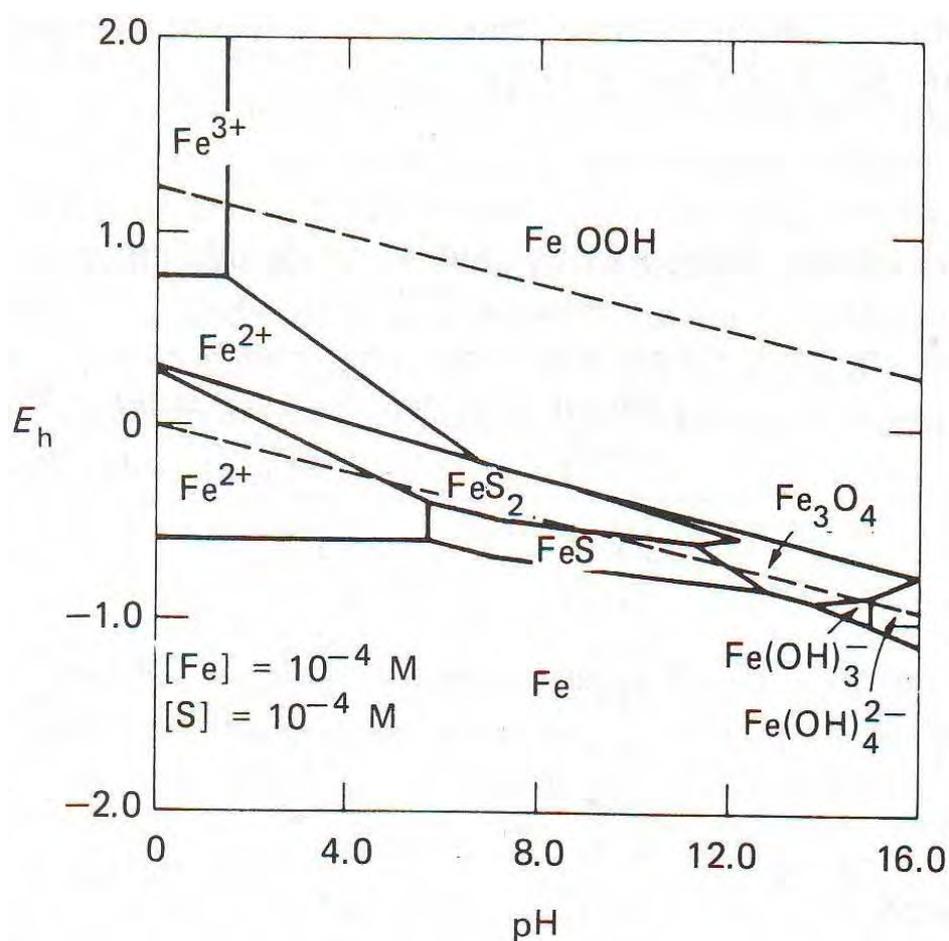
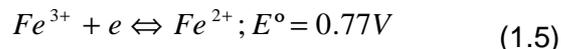


Figura 1.3: Diagrama Eh-pH para el sistema Fe-S-H₂O a 25 °C (Marsden, House, 2006).

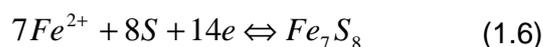
En solución oxidante, y por debajo de pH =2, el Fe (II) es oxidado a Fe (III), que se da para el caso de los cationes simples de la siguiente manera:



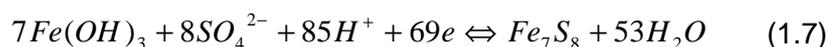
Las especies de Fe (III) forman agentes oxidantes fuertes que pueden participar en las reacciones de oxidación.

El Fe (III) puede formar goethita (FeOOH) y, a continuación hematita (Fe₂O₃), a medida que el agua se elimina.

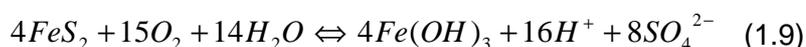
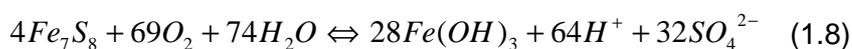
La Pirrotíta Fe_(1-x)S, (donde x = 0-0,5) es menos estable que la pirita y la marcasita, puede ser oxidado mediante técnicas de aireación y en solución ácida, por debajo de pH = 6, para las condiciones dadas en la figura 1.3, con la siguiente reacción:



Y en soluciones menos ácidas (es decir, pH > 6):



La Pirrotíta y la marcasita son menos estables y se oxidan a hidróxido de Fe (III), aproximadamente por encima de pH=2. Las reacciones ilustran como la pre-aireación parcial solubiliza los sulfuros reactivos de hierro como la pirrotíta (Ecuación 1.8) y la marcasita (Ecuación 1.9) que resulta en la generación de los precipitados de hidróxido férrico y sulfato.

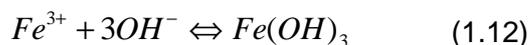
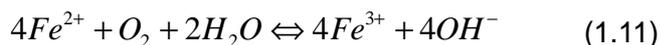
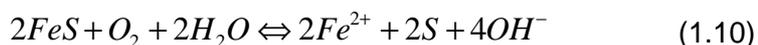


El ácido generado por la oxidación reacciona con las sales de metales alcalinos disponibles en el mineral para precipitar el yeso o sulfato de otras especies. Alternativamente, si el contenido de sulfuro reactivo es alto, un material adecuado, como la cal se pueden agregar para neutralizar el ácido que se forma.

El hidróxido férrico precipitado es bastante estable en las condiciones típicas de cianuración. Además, la oxidación produce la formación de sulfato en lugar de iones de azufre que resulta en la formación de tiocianato. El ión sulfato se forma termodinámicamente estable y no reacciona con el cianuro y oxígeno.

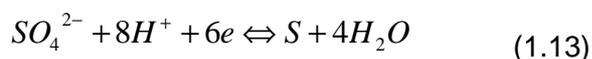
Las reacciones de oxidación que se mostraron anteriormente, indican como la preaireación reduce la concentración de los consumidores de cianuro y oxígeno por la oxidación.

Dalley, y Allis (2006), explicaron el efecto de oxidación en medio alcalino en sulfuros de hierro reactivos en ausencia de cianuro mediante las siguientes reacciones:



1.2.2 Reacciones Químicas de oxidación de Azufre

La formación de azufre elemental durante la oxidación de los sulfuros es identificado como un producto que puede causar varios problemas ya que consume cianuro y oxígeno a través de su oxidación a tiocianato y tiosulfato en presencia de cianuro (Marsden y House, 2006).



En la figura 1.4, se muestra el diagrama Eh-pH para el sistema S-H₂O, donde termodinámicamente se predice que el azufre se oxida con relativa facilidad a sulfato en un amplio rango de pH, aunque la especie bisulfato (HSO₄⁻) se forma por debajo de pH=1.5; como se indica en la pequeña región de la estabilidad del azufre.

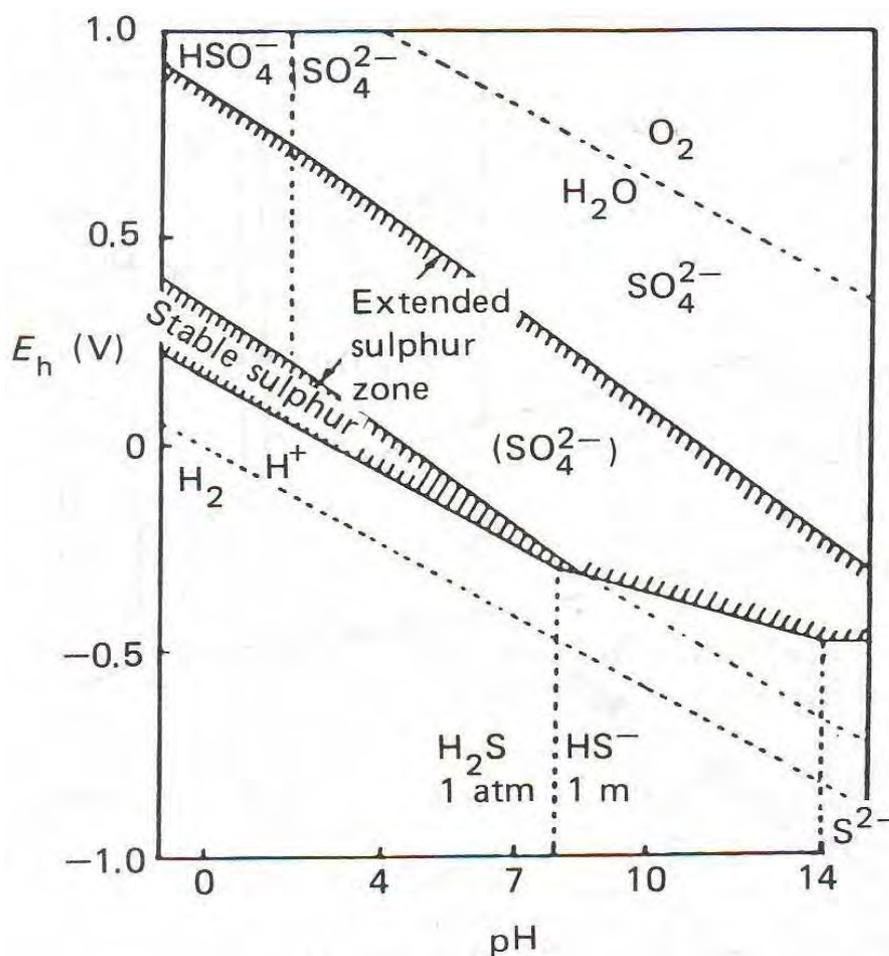


Figura 1.4: Diagrama Eh-pH del sistema S-H₂O a 25°C. (Marsden, House, 2006).

El azufre elemental no se oxida de forma apreciable en soluciones ácidas que contienen Fe (III). En la práctica se produce una amplia zona de estabilidad de azufre, que es más consistente con las observaciones dentro de plazos realistas para los procesos metalúrgicos como se muestra en la figura 1.5. La reducción de

las especies de sulfato en la solución también está limitada por la cinética lenta y la formación de iones sulfato, se considera irreversible para todos los propósitos prácticos. En la figura 1.5 se muestra el diagrama Eh-pH para el sistema S-H₂O con la especie sulfato omitido.

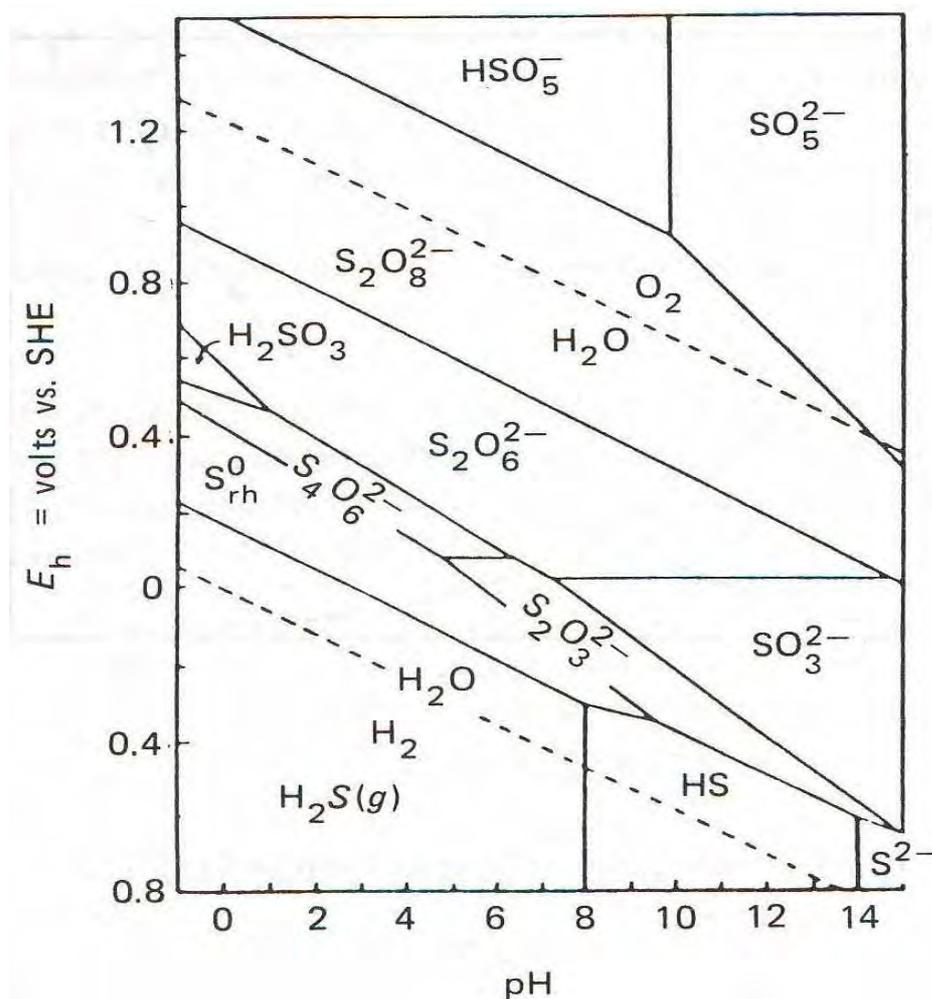
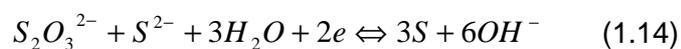
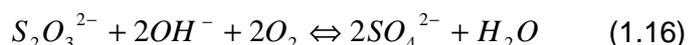


Figura 1.5: Diagrama Eh-pH del sistema S-H₂O a 25°C con el ión de SO₄²⁻ omitido. (Marsden, House, 2006).



En resumen la pre-aireación a través del oxígeno ataca a los sulfuros de hierro para formar tiosulfato y sulfato que se pueden explicar de acuerdo a las siguientes reacciones:

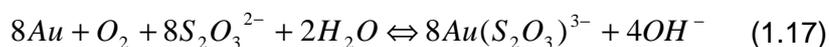


El tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$) forma un complejo estable con el oro y en algunos casos la disolución del oro durante la oxidación. Esto se confirma en la práctica por la detección de concentraciones bajas de oro en las soluciones del proceso de oxidación en ausencia de cualquier agente lixivante. En principio, la oxidación de los sulfuros es simultánea con la disolución de oro de especies generadas con tiosulfato, por lo tanto las reacciones de oxidación es una ruta potencial de extracción de oro (Marsden, House, 2006).

1.2.3 Lixiviación de oro con tiosulfato

El Tiosulfato forma fuertes complejos con una variedad de metales como oro, plata, cobre, hierro, cadmio, níquel, cobalto, platino y mercurio. Hay dos complejos de oro con tiosulfato $Au(S_2O_3)_2^{3-}$ y $Au(S_2O_3)^-$, siendo la primera la más estable (Zhang 2004).

Se sabe que la disolución de oro en soluciones acuosas de tiosulfato con oxígeno disuelto como oxidante es muy lenta. La reacción general se puede ilustrar de la siguiente manera:



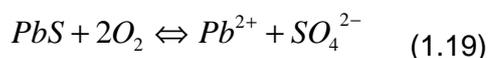
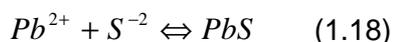
1.3 Utilización de sales de Plomo

Dalley y Allis (2006), resumen los posibles mecanismos que explican la iniciativa de utilizar las sales de plomo, que puede tener efectos beneficiosos en la cianuración de oro de la siguiente manera:

El plomo puede activar superficies de oro pasivado, al reaccionar con películas de azufre en la superficie de oro.

El plomo también elimina al ión sulfuro de la solución como PbS insoluble, esto evita que se produzca adsorción de iones de azufre en la superficie del oro, el cual inhibe la lixiviación de oro.

Por último, el plomo puede constituir una vía de mediación para la oxidación de azufre a sulfato de acuerdo con las siguientes reacciones:

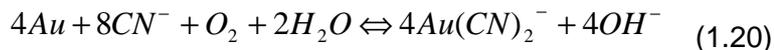


Esto indica que la adición de nitrato de plomo durante la oxidación aumenta significativamente la cinética de disolución de oro y la disminución de consumo de cianuro.

1.4 Química de la cianuración del oro

La cianuración es el método más común para recuperar el oro de los minerales. El oro se oxida y se disuelve en una solución alcalina de cianuro en presencia de oxígeno disuelto como oxidante, formando Au (I) complejo de cianuro, $Au(CN)_2^-$.

La reacción general de la lixiviación del oro puede ser expresada por la siguiente ecuación:



Con el fin de representar la química de equilibrio de la reacción de cianuración, a menudo es conveniente utilizar el diagrama Eh-pH (diagrama de Pourbaix). Las dos líneas punteadas indican los equilibrios:

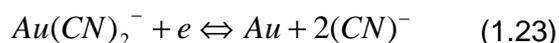
Para la reducción de agua en hidrógeno (línea inferior):



Para la reducción de oxígeno en el agua (línea superior):



Entre las dos líneas está el área en que el agua es estable. La región indica el área de la estabilidad del complejo de oro como $Au(CN)_2^-$ en soluciones acuosas de cianuro que se produce en un amplio rango de valores de pH, como se ilustra en la figura 1.6, el oro puede ser oxidado por el oxígeno en un potencial mas o menos de - 0.52 V, y ser soluble en soluciones alcalinas de cianuro a pH alto (>10). A efectos prácticos, la estequiometría de la reacción de disolución de oro es según la siguiente reacción:



Mientras que la reacción reductora de oxígeno puede ser presentada por la siguiente reacción:

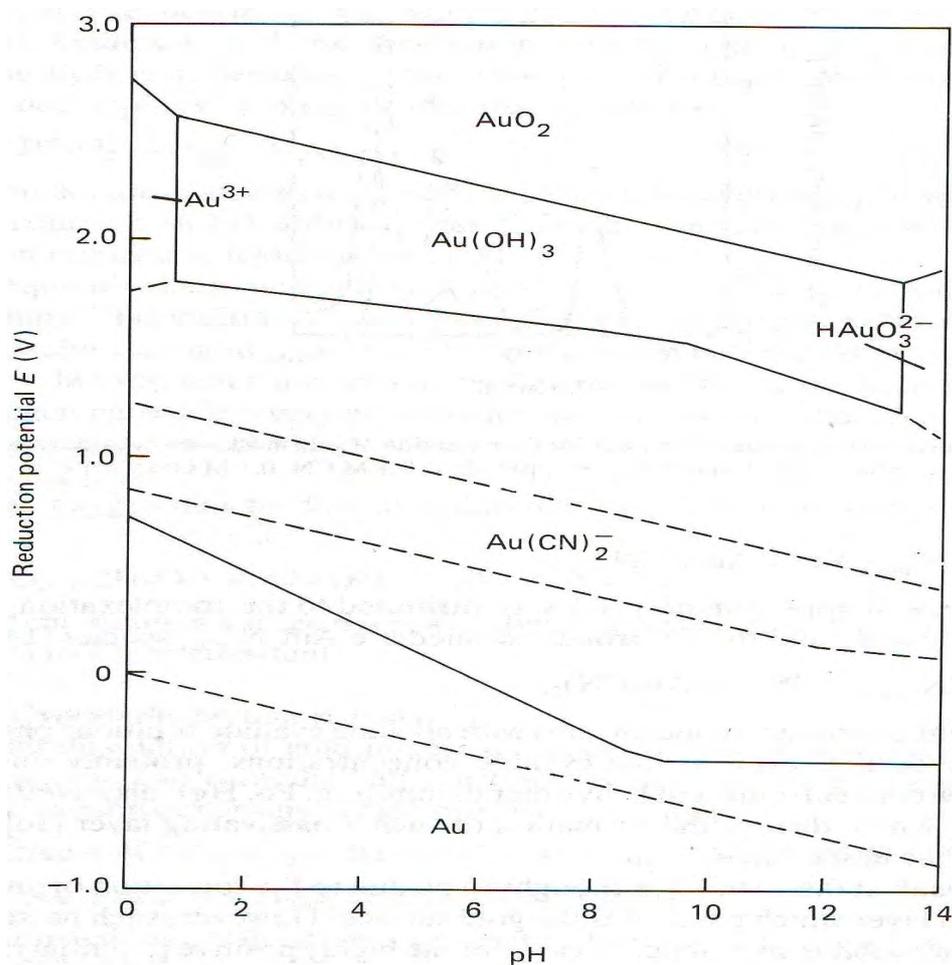


Figura 1.6: Diagrama Eh-pH del sistema de Au-CN-H₂O, a 25 °C (Zhang S. 2004).

1.5 Antecedentes

1.5.1 Tratamiento Metalúrgico de Pirrotitas que contienen Oro (Parra. H; Miranda, R, 2010)

Las pruebas consistieron en cianurar directamente el mineral de cabeza y concentrados y también cianurando aplicando la técnica de la preoxidación.

Los resultados obtenidos mediante la cianuración con y sin preoxidación del mineral

de cabeza se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 1.1. Resultados de la cianuración del mineral de cabeza

Prueba	% Rec. Au
Oxidación alcalina con NaOH	93.07
Oxidación alcalina con Ca(OH)_2	84.31
Cianuración convencional + Pb(NO)_3	81.50
Cianuración convencional	75.88

El resultado aplicando la técnica de preoxidación del mineral de cabeza aumenta la recuperación.

Los resultados obtenidos mediante la cianuración con y sin preoxidación del concentrado de flotación se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 1.2. Pruebas de cianuración del concentrado de flotación

Prueba	% Rec. Au
Oxidación alcalina con Ca(OH)_2	86.30
Cianuración Intensiva	87.57

Los resultados aplicando la técnica de preoxidación y cianuración directa del concentrado con similares.

1.5.2 Pruebas de Laboratorio de cianuración intensiva (Gekko Systems, 2010)

Las pruebas se realizan en un reactor en circuito batch que procesa los concentrados o minerales de alta ley de oro a una alta fuerza de cianuro (mayor o igual al 1%) en un ambiente oxidante. El propósito del estudio fue determinar si el

material es dócil para aplicar una cianuración intensiva. En algunos casos no fue posible obtener buenos resultados por lo tanto se oxida el concentrado para aumentar las recuperaciones.

Los concentrados gravimétricos, flotación y flotación oxidado fueron sometidos a una serie de lixiviaciones intensivas para establecer las condiciones óptimas de lixiviación.

Las recuperaciones que se obtienen superan el 90%, a una gran fuerza de cianuro. Las condiciones de cianuración se muestran en la tabla 1.3; y los resultados en la tabla 1.4.

Tabla 1.3: Condiciones de la cianuración intensiva

Prueba	NaOH (1); CaO(2) Kg/tms	Adición de O ₂	Oxidación
CF	6.1 (1)	Si	No
CF+CG	6.5 (1)	Si	No
CF ox (1)	13.2 (1)	Si	No
CG	4.6 (1)	Si	No
CG ox	5.0 (2)	Si	Si
CF ox (2)	5.0 (2)	Si	Si

Tabla 1.4: Resultados de la cianuración intensiva

Prueba	%Rec. Au 24 hr	Ley de Cabeza g/tms	Ley de Relave g/tms	NaCN %	NaCN kg/tms
CF	97.5	85.9	2.2	2.0	153.6
CF+CG	98.0	203.2	4.1	2.0	145.1
CF ox (1)	97.7	49.1	1.1	2.0	110.2
CG	95.4	2024.8	93.2	2.0	18.5
CG ox	93.5	2004.4	131.0	2.0	11.9
CF ox (2)	96.1	96.7	3.8	1.0	49.0

Donde:

- CF: Concentrado de flotación (no se aplicó oxidación)
- CF+CG: Mezcla de concentrado de flotación y gravimétrico
- CF ox (1): Concentrado de flotación oxidado (se envió muestra oxidada)
- CG: Concentrado gravimétrico (no se aplicó oxidación).
- CG ox: Concentrado gravimétrico oxidado.
- CF ox (2): Concentrado oxidado de flotación (se aplicó oxidación)

Las pruebas de cianuración intensiva se llevan a cabo en botellas rodantes con muestras tomadas en intervalos regulares para determinar la cinética de lixiviación. Se añade el oxígeno bajo condiciones normales a la lixiviación de tal manera de proporcionar un entorno oxidante.

Las pruebas indican que puede lograrse recuperaciones pero con altos consumos de cianuro. La cinética es rápida, con 24 horas para utilizar la unidad de proceso por lotes ILR, aunque se obtiene leyes de relaves muy altos sobre todo con el concentrado gravimétrico. Se demuestra que el concentrado de flotación debidamente oxidado aumenta la recuperación y más aun agregándole una alta concentración de cianuro. Gekko recomienda que el concentrado gravimétrico y flotación deban ser tratados por separado por las condiciones económicas.

CAPITULO II

METODOLOGÍA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

2.0 TRABAJO EXPERIMENTAL

Se realizaron un conjunto de pruebas a nivel de laboratorio y a nivel piloto que permitieron definir el mejor proceso de extracción de oro de los concentrados.

Para las pruebas se realizaron muestreos de ley de cabeza, monitoreos de solución, cuantificación y distribución de oxígeno. También Se realizaron pruebas de lavado y filtración de la pulpa oxidada.

2.1 Planta Piloto

La Planta Piloto consta de tres tanques agitadores 12'Øx12', un molino de bolas 3'Øx3' batch y un molino de bolas 6'Øx6' en circuito continuo, también se tiene instalado un blower que inyecta aire a baja presión URAI 65 (6 psi de presión máxima) a los tanques agitadores. Adicionalmente posee una línea de aire que suministra la compresora GA-315 de alta presión (100 psi de presión máxima a mina) y una línea de suministro de oxígeno desde la Planta XORBOX de 10.1 m³O₂/hr con 94.70 % de pureza instalada en la Planta Piloto.

2.2 Origen de Concentrado

Los concentrados son de naturaleza pirrotítica con contenido de oro, las cuales fueron obtenida mediante los procesos de concentración gravimétrica y flotación en una Planta de Puno.

2.3 Técnicas de recolección de datos

Los concentrados son recepcionadas en sacos o big bags de una tonelada y antes de ser vaciados a la tolva de finos, se muestrean cada uno ellos para lo cual se aplica las técnicas de muestreo para determinar la humedad y ley de cabeza de oro. Luego el concentrado es molido en un molino de bolas en húmedo y depositado en los tanques agitadores para proceder a su monitoreo de pH, temperatura, leyes de oro y fierro, y concentración de oxígeno disuelto hasta oxidar la pulpa y lixiviarla con cianuro a pH alcalino.

2.4 Caracterización mineralógica de los concentrados

Los concentrados gravimétricos y de flotación, por tratarse de muestras de un mismo proceso, poseen características mineralógicas cualitativas similares y sólo varían las proporciones en que las especies minerales están presentes, como partículas libres o mixtas.

La muestras presentan una granulométrica algo heterogénea compuesta de gangas y minerales como: pirrotíta, pirita, oro nativo, hematita y limonitas.

- La pirrotíta, es el mineral más abundante en la muestra, se presenta como cristales de formas subangulosas. El mayor porcentaje se encuentra en forma de granos libres.
- El oro nativo, se presenta como granos de formas redondeadas y libres

acompañado de hematita y limonitas.

- La hematita y limonitas se presentan como formas subangulosas, y se presentan acompañando al oro nativo.

Tabla 2.1: Abreviatura de minerales presentes

Nº	Abreviatura	Nombre	Composición Química
1	Au	oro nativo	Au
2	GGs	"gangas"	(variada)
3	Ox.Fe	limonitas, hematita	FeOOH, Fe ₂ O ₃
4	po	pirrotita	Fe _(1-x) S

2.4.1 Concentrado de Flotación

A continuación se muestran las fotomicrográficas de los concentrados de flotación en las mallas +200 y -200.

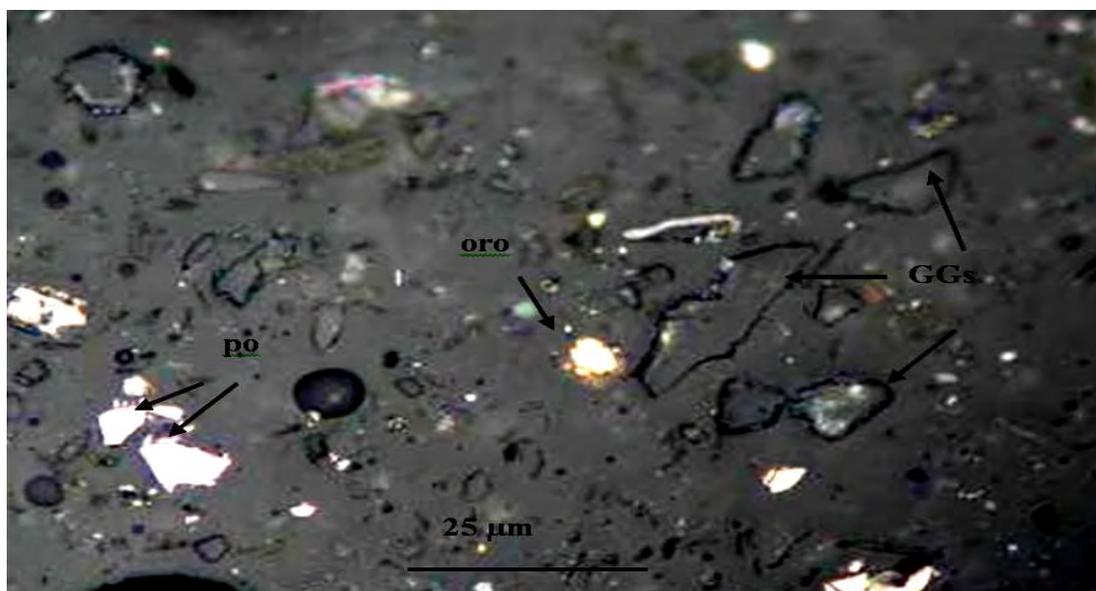


Figura 2.1: Malla +200. En la parte central se aprecia un grano de oro nativo libre el cual mide aproximadamente 8 micrones. También se aprecian granos libres de pirrotita y gangas.

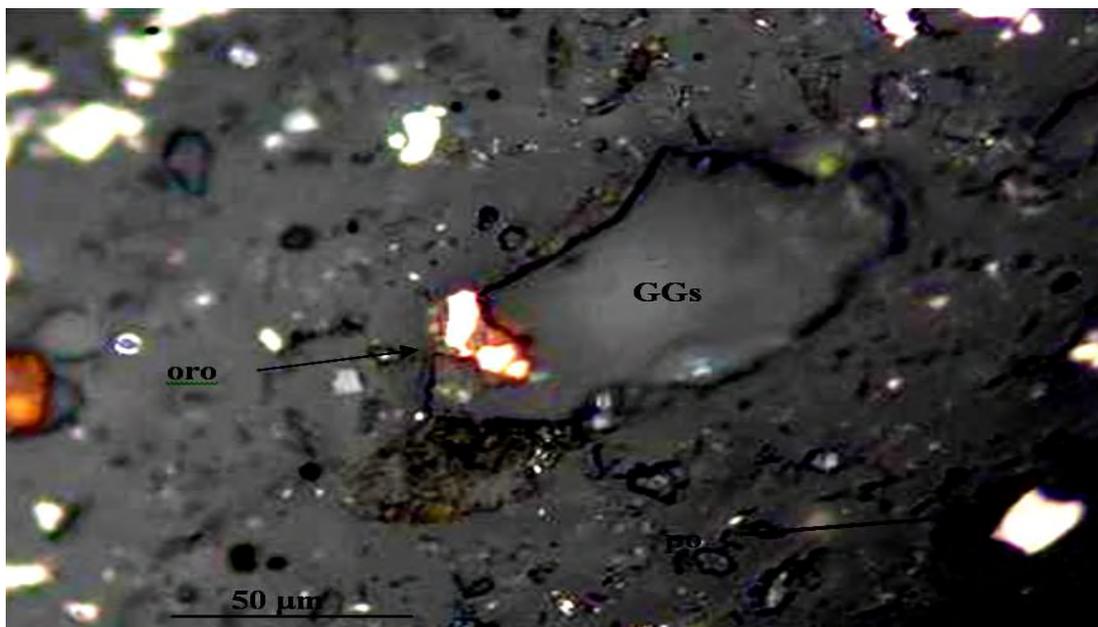


Figura 2.2: Malla +200. Se aprecia un grano mixto compuesto por gangas y de oro nativo. Un grano de oro se encuentra al borde de la ganga y el otro está incluido en ella. Aparte existen granos libres de pirrotita.

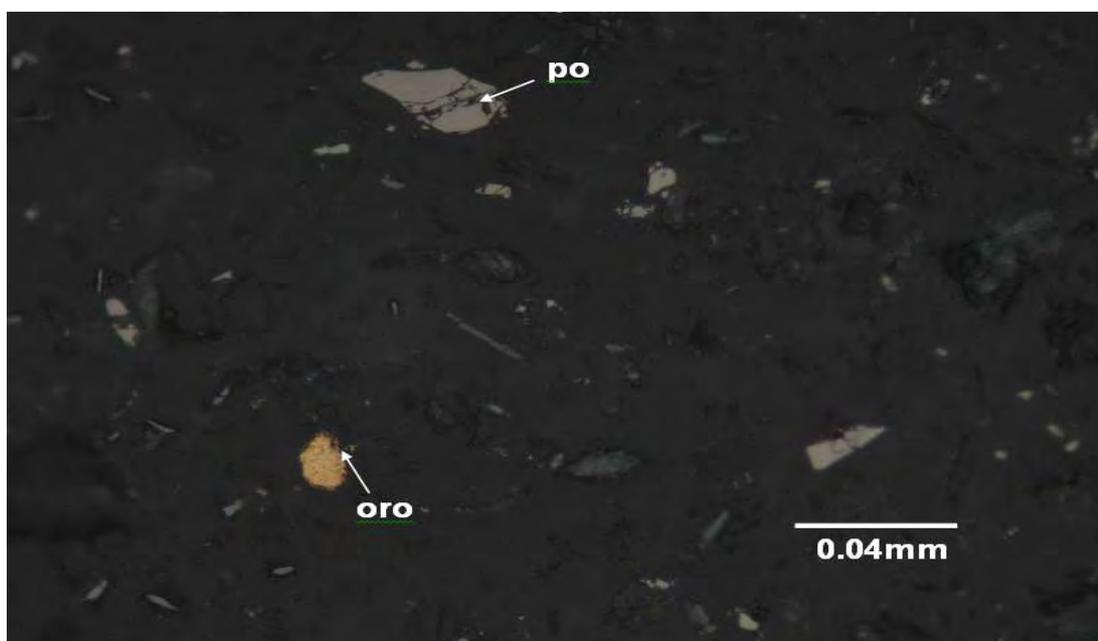


Figura 2.3: Malla + 200. Se observa un grano libre de oro nativo de aproximadamente 20μm, acompañado de pirrotita



Figura 2.4: Malla -200. Se observa presencia de un grano de oro libre de 20 μ m, con algunas impurezas de limonitas-hematita.

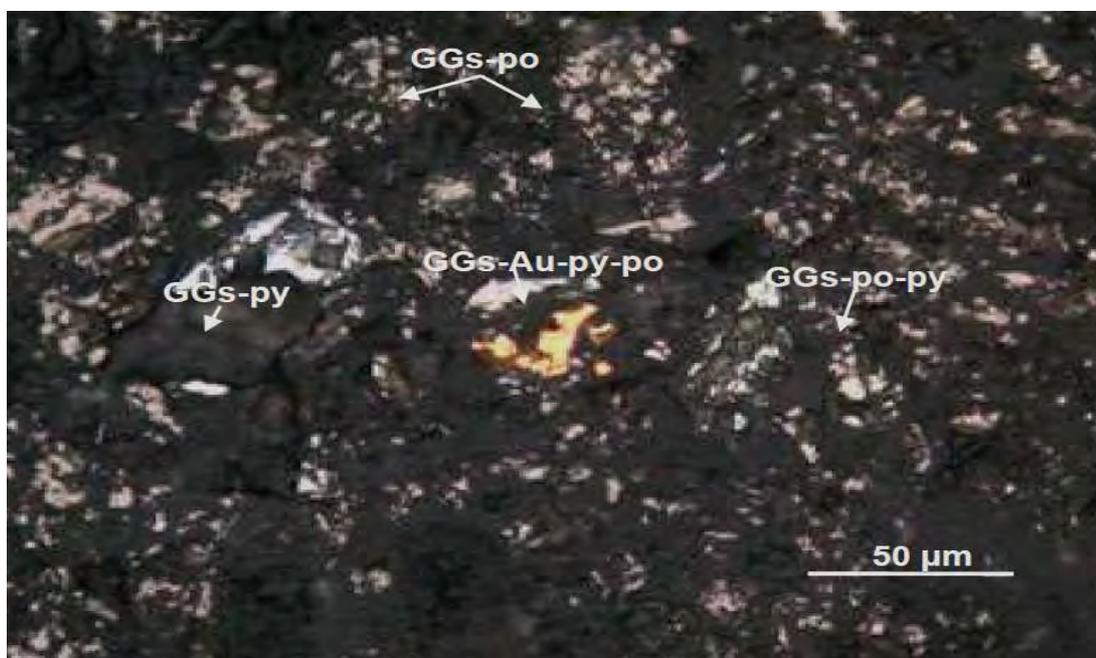


Figura 2.5: Malla -200. Se aprecia granos mixtos de gangas, oro, pirita y pirrotíta, de gangas con pirita, gangas con pirrotíta y gangas con pirrotíta y pirita.

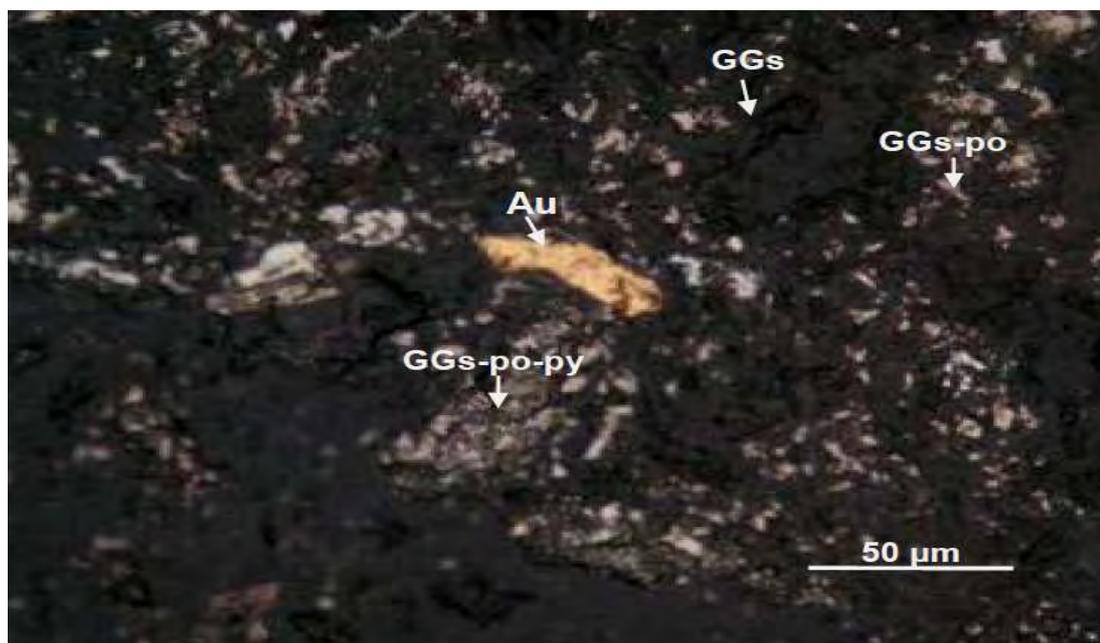


Figura 2.6: Malla -200. Se aprecia grano de oro libre y gangas libres. Los minerales asociados son de gangas con pirrotita y gangas con pirrotita y pirita.

2.4.2 Concentrado Gravimétrico

A continuación se muestran las fotomicrografías de los concentrados gravimétricos en las mallas +200 y -200.

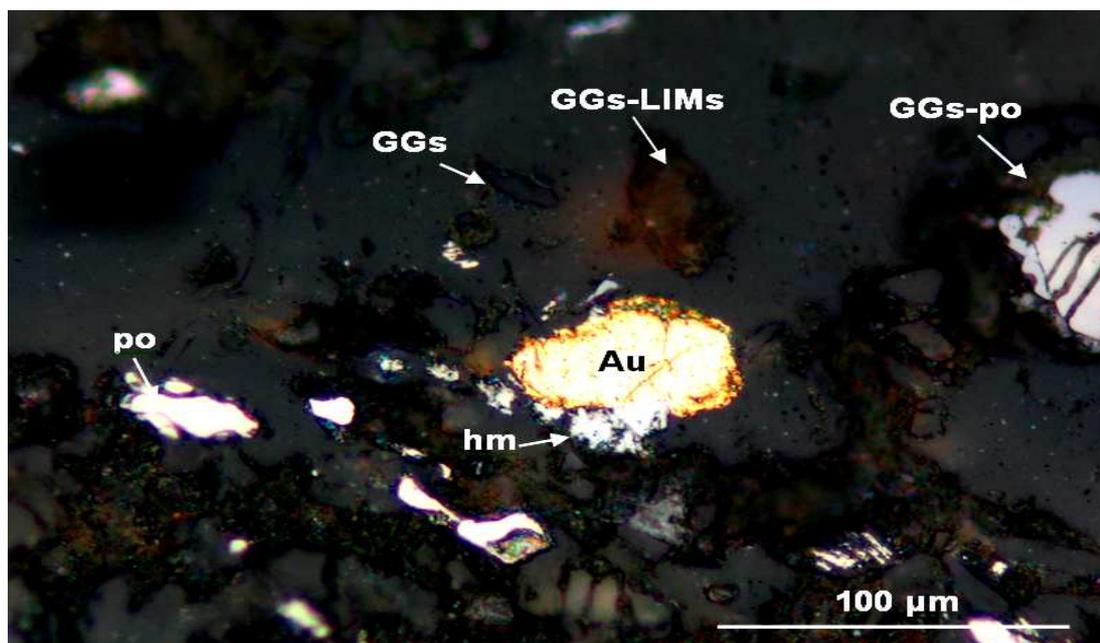


Figura 2.7: Malla +200. Se observa un grano de oro con hematita en sus bordes. Asimismo se encuentran granos libres de pirrotita, de gangas y asociaciones de gangas-pirrotita y gangas-limonitas.

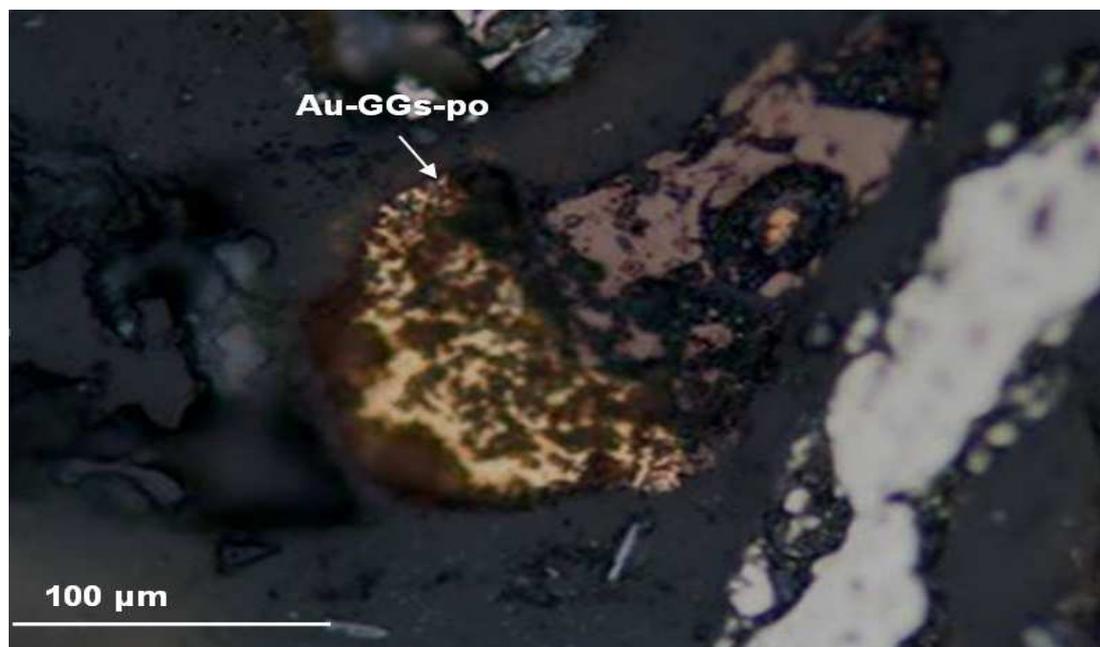


Figura 2.8: Malla +200. Se observa un grano de oro asociado a gangas y pirrotita.

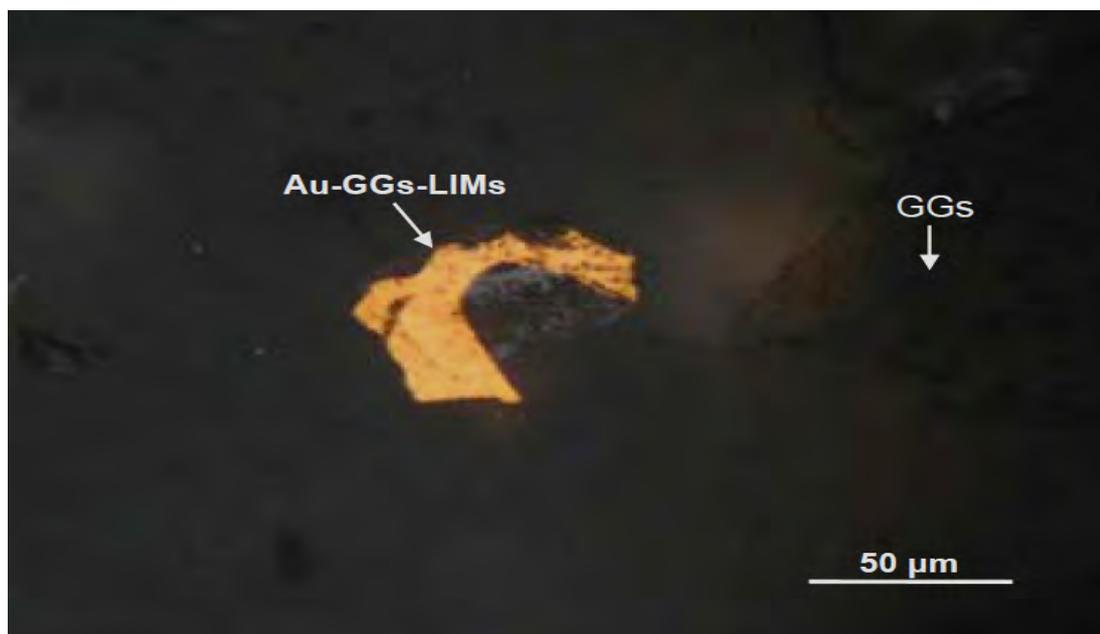


Figura 2.9: Malla +200. Se observa un grano de oro asociado con gangas y limonitas y gangas libres.

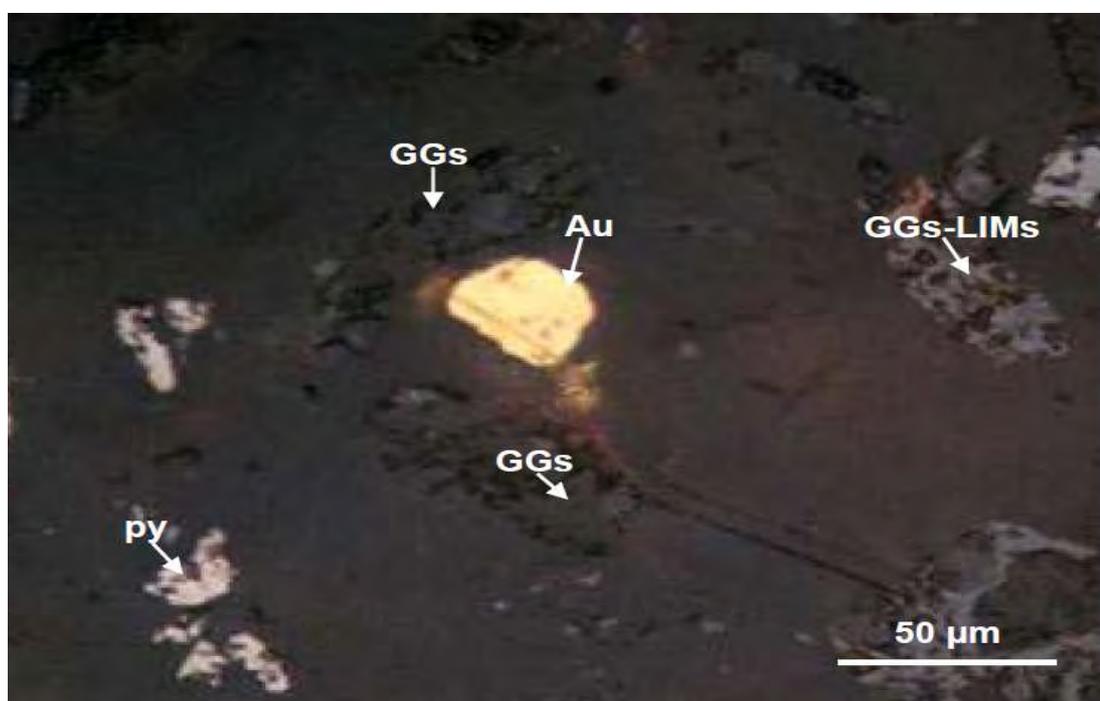


Figura 2.10: Malla -200. Se observa un grano de oro libre, de gangas, pirita y grano mixto de gangas con limonitas.

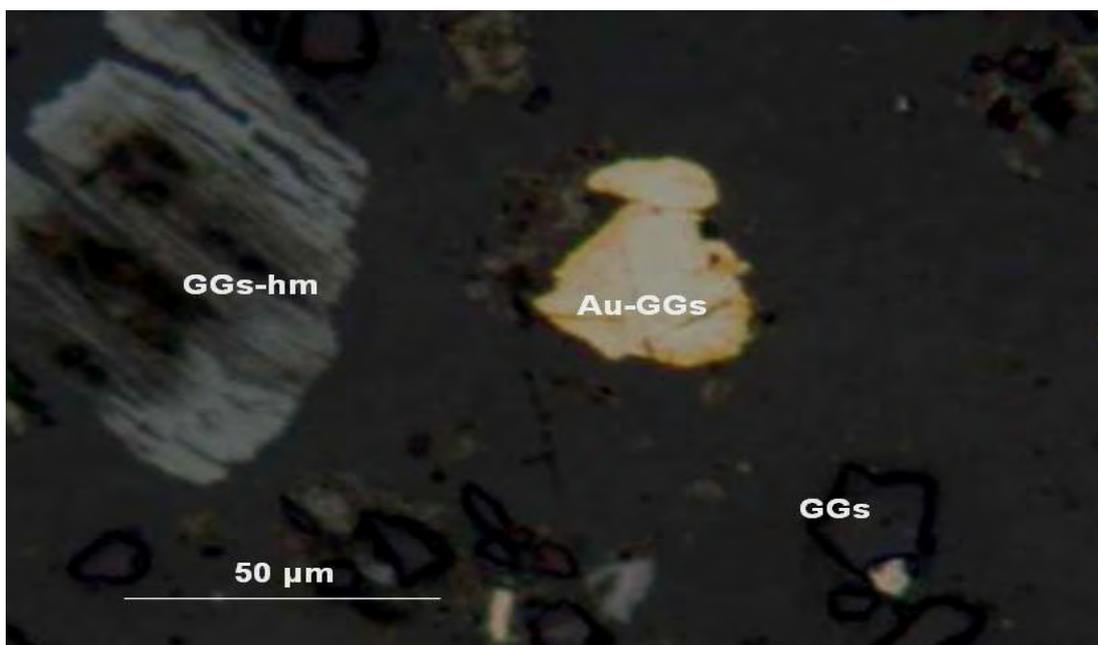


Figura 2.11: Malla -200: Se observa un grano de oro con gangas, gangas con hematita y granos libres de gangas.

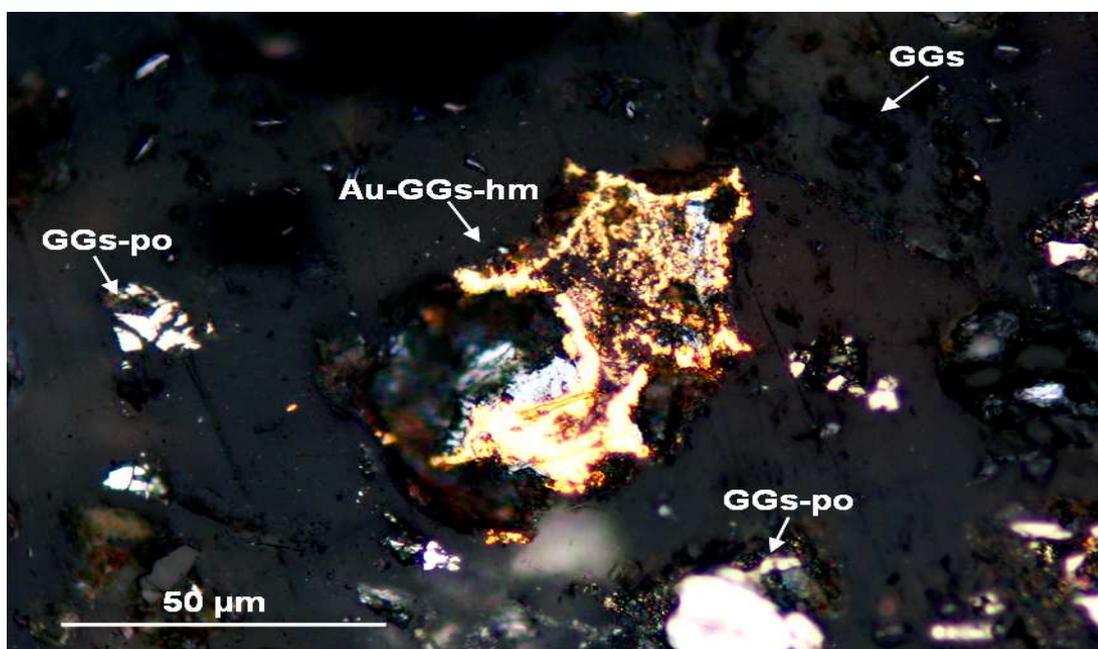


Figura 2.12: Malla -200. Se observa un grano mixto de oro con gangas, hematita así como granos de gangas con pirrotita y granos libres de gangas.

2.5 Pruebas de cianuración con etapas previas de oxidación con y sin cal

Se realizaron en total seis grupos de pruebas de las cuales el primer grupo se realizó a nivel de laboratorio para determinar la dosificación óptima de nitrato de plomo y los otros cinco a nivel piloto consistieron de pruebas de cianuración con y sin preoxidación.

2.5.1 Pruebas a nivel de laboratorio con adición de Nitrato de Plomo

Estas pruebas se efectuaron con la mezcla de los concentrados de flotación y de gravimetría.

- **Procedimiento experimental**

Se realizaron cinco pruebas para determinar la dosificación adecuada de Nitrato de Plomo. La dosificación de reactivos se realiza en la etapa de oxidación de concentrados, primero con cal y posteriormente con nitrato de plomo. Luego se acondiciona hasta completar la oxidación de la pulpa a 6.2 ppm de oxígeno disuelto. Luego se adiciona cianuro de sodio en una concentración inicial de 3000 ppm. En la etapa de cianuración se mantiene la pulpa a 1500 ppm de concentración de cianuro libre y 6.5 ppm de oxígeno disuelto.

La dosificación de nitrato de plomo varía de acuerdo al esquema de pruebas de la figura siguiente:

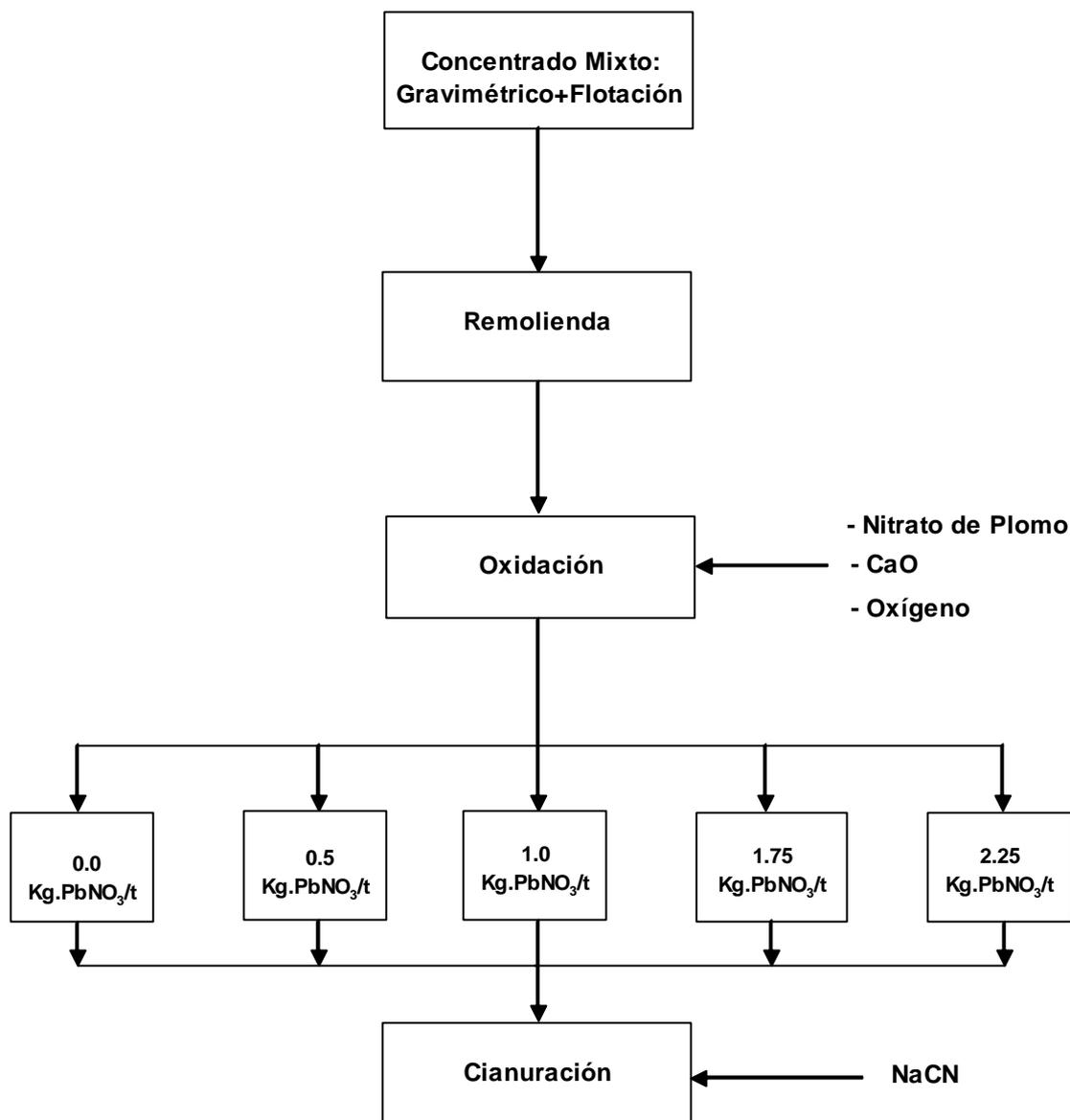


Figura 2.13: Esquema de pruebas con Nitrato de Plomo

- **Condiciones metalúrgicas**

Las condiciones metalúrgicas para las diferentes etapas de las pruebas se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 2.2: Condiciones Metalúrgicas de oxidación

Oxidación						
Detalle	Unidad	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Peso	Kg	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Granulometría	%-400m	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0
CaO	Kg/tms	43.25	37.45	36.95	38.00	39.90
PbNO ₃	Kg/tms	0.00	0.50	1.00	1.75	2.25
% Sólido	%	25.40	25.49	25.50	25.48	25.45
Tiempo	hr	60.00	45.00	45.00	46.00	46.00
pH final	-	10.67	10.94	10.92	10.67	10.67
Oxígeno	ppm	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5

Tabla 2.3: Condiciones Metalúrgicas cianuración

Cianuración						
Detalle	Unidad	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Peso	Kg	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
% Sólido	%	25.40	25.49	25.50	25.48	25.45
Tiempo	h	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00
%NaCN (libre)	ppm	1500	1500	1500	1500	1500
NaCN	Kg/tms	37.25	36.45	36.50	37.45	36.80
pH final	-	10.98	11.10	10.78	10.76	10.98
Oxígeno	ppm	5.5 - 6.5	5.5 - 6.5	5.5 - 6.5	5.5 - 6.5	5.5 - 6.5

- Resultados**

En la tabla 2.4; se indica la dosificación de Nitrato de Plomo en la Etapa de oxidación.

Tabla 2.4: Dosificación de Nitrato de Plomo en la Etapa de oxidación

Prueba	Pb(NO) ₃ Kg/tms	Tiempo de Oxidación hr
1	0.00	82.0
2	0.50	73.0
3	1.00	73.0
4	1.75	76.0
5	2.25	76.0

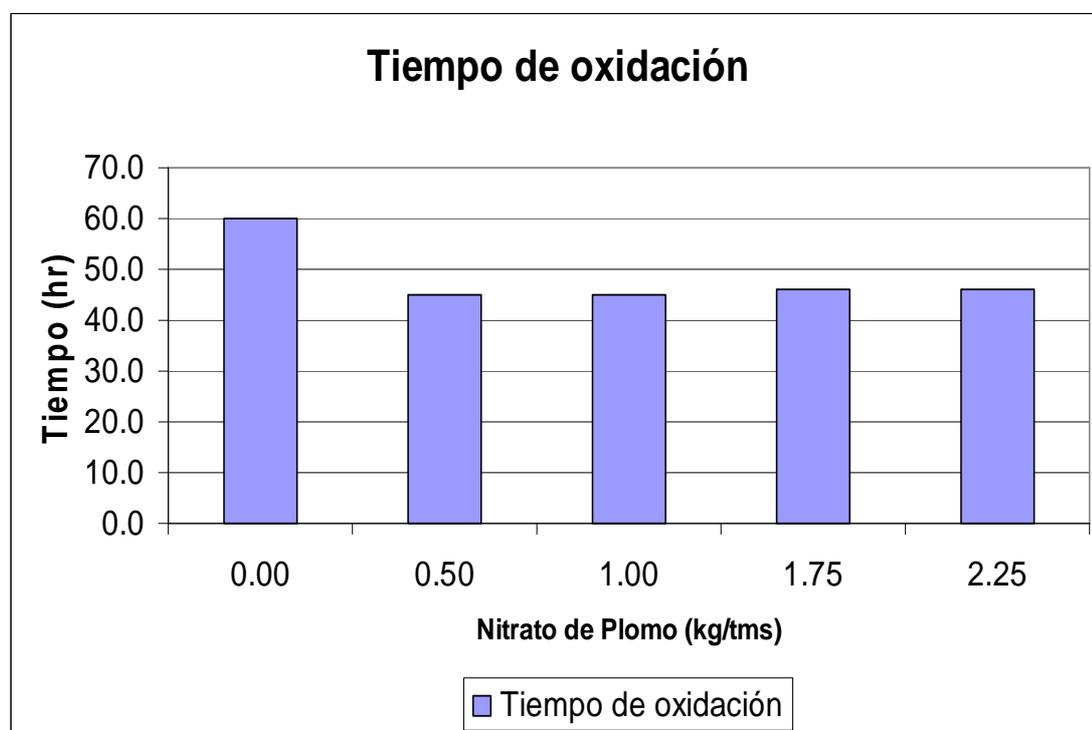


Figura 2.14: Dosificación de Nitrato de Plomo en la Etapa de oxidación

El uso del Nitrato de Plomo aumenta la cinética de oxidación, sin embargo, no se aprecia una gran diferencia para determinar la dosificación óptima.

En la tabla 2.5; se indica la recuperación de oro con respecto a la dosificación de Nitrato de Plomo en la Etapa de cianuración.

Tabla 2.5: Ratio óptimo de dosificación de Nitrato de Plomo

Prueba	%Rec. Au	Nitrato plomo Kg/tms
1	92,90	0.00
2	93,35	0.50
3	92,99	1.00
4	92,86	1.75
5	92,70	2.25

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 2.5, la mayor recuperación de oro se obtiene con la prueba número dos con un consumo de óptimo de 0.5 kg.Pb(NO)₃/tms de concentrado.

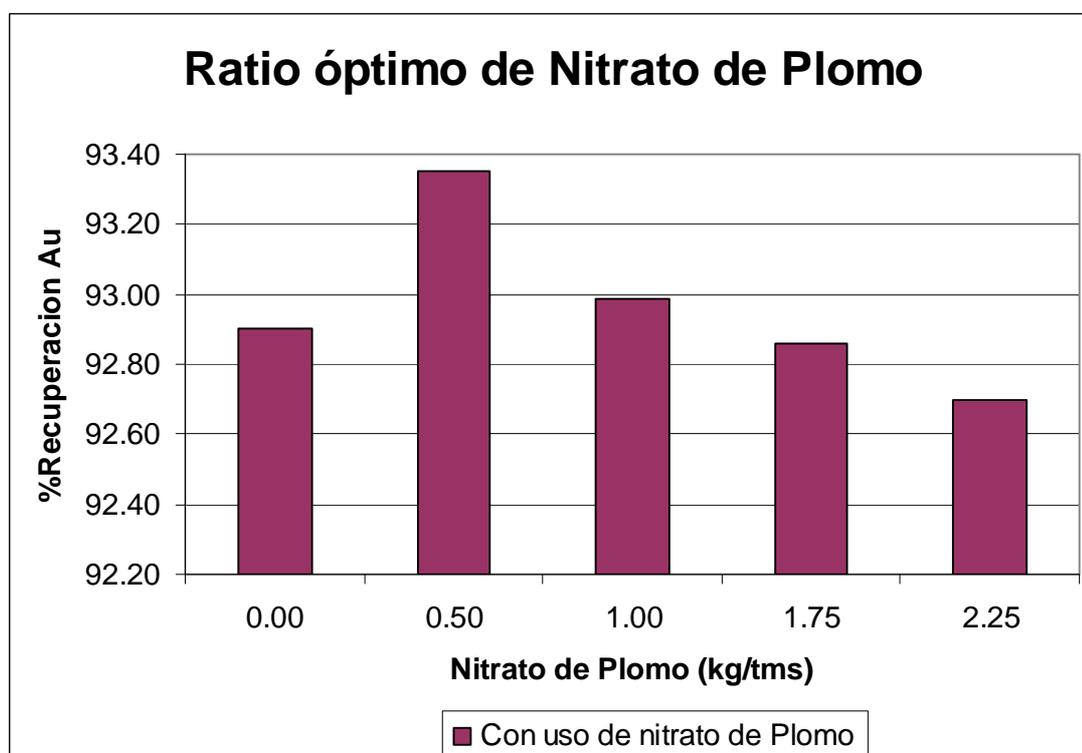


Figura 2.15: Ratio óptimo de consumo de Nitrato de Plomo

La figura 2.15, indica que la mayor recuperación de oro se obtiene dosificando 0.5 kg de Nitrato de plomo por tonelada de concentrado.

2.5.2 Prueba Piloto de cianuración directa de los concentrados de Flotación

Se realiza una prueba piloto de cianuración directa para evaluar sus resultados como recuperación de oro y consumo de reactivos.

- **Procedimiento Experimental**

Los concentrados de flotación contienen una ley promedio de 100 g.Au/tms de concentrado. Para esta prueba se tomó un lote de 29.47 tms de concentrado, que consiste de una etapa de molienda continua en un molino de bolas 6'Øx6' adicionando también cal y cianuro. El producto de la molienda se deposita en tres tanques agitadores 12'Øx12' hasta completar la carga. Luego se completa la cianuración en los tanques manteniendo una concentración de 0.5% de cianuro libre a un pH de 11. El proceso de complementa con la etapa de recuperación que se realiza con carbón activado (CIP).

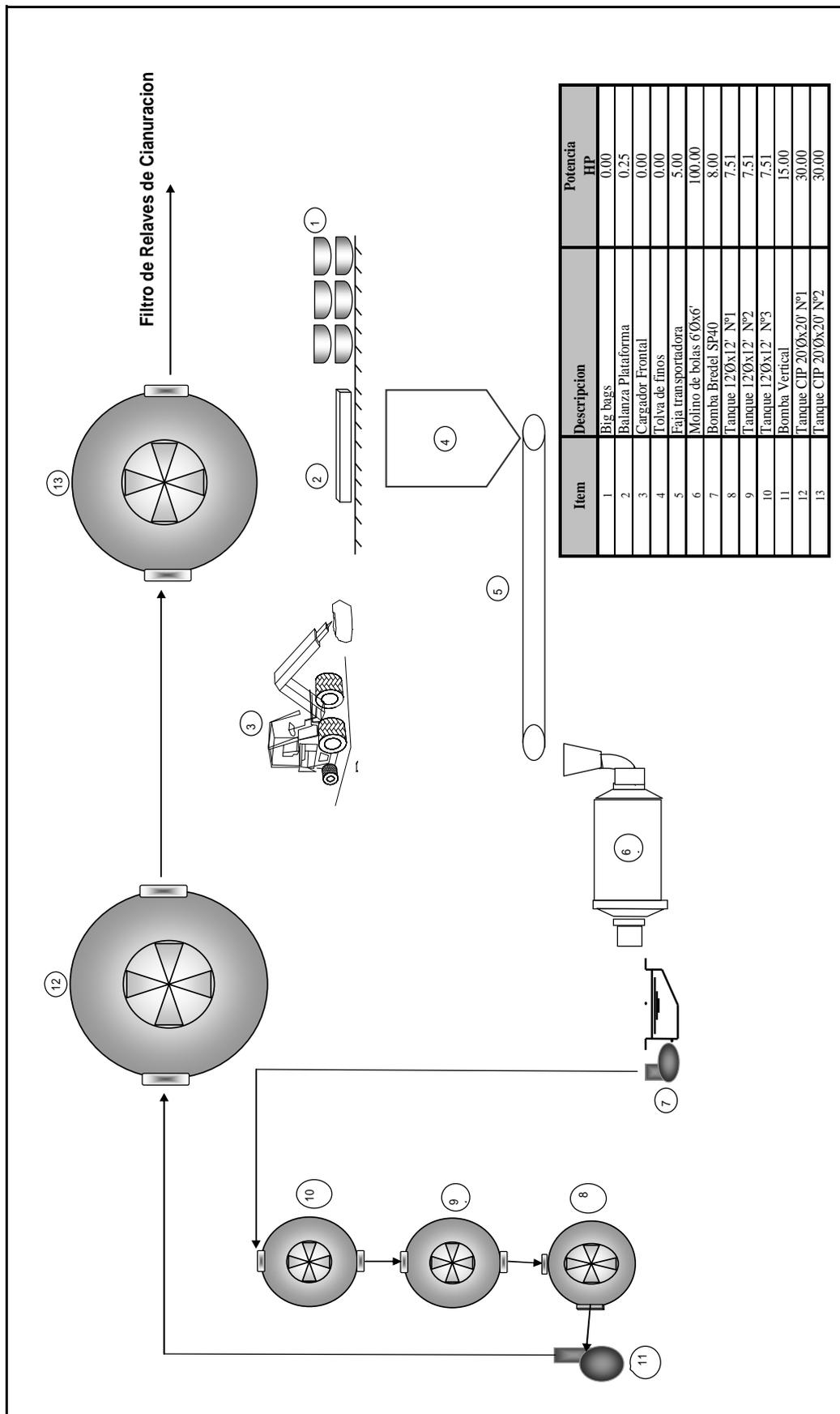


Figura 2.16: Diagrama prueba Piloto de cianuración directa

- **Condiciones Metalúrgicas**

Las condiciones de remolienda y cianuración se presentan en las tablas siguientes:

Tabla 2.6: Condiciones metalúrgicas de remolienda

Remolienda				
Detalle	Unidades	Tanque N° 1	Tanque N° 2	Tanque N° 3
Peso seco	tms	9.82	9.82	9.82
%Sólidos	-	56.0	56.0	56.0
Granulometría	%-malla 400	96.0	96.0	96.0
NacN (libre)	ppm	5,000	5,000	5,000
CaO	Kg/tms	54.98	54.98	54.98
PbNO ₃	Kg/tms	0.50	0.50	0.50
NaCN	Kg/tms	122.20	91.65	91.65

Tabla 2.7: Condiciones metalúrgicas de cianuración

Cianuración				
Detalle	Unidades	Tanque N° 1	Tanque N° 2	Tanque N° 3
Peso seco	tms	9.82	9.82	9.82
% Sólido	-	29.80	29.80	29.80
Tiempo	hr	96	76	52
NacN (libre)	ppm	460	460	460
pH final	-	11.25	11.26	11.46
Oxígeno	ppm	0.10	0.16	0.12
CaO	Kg/tms	0.00	0.00	0.00
NaCN	Kg/tms	81.47	81.47	71.28

- **Resultados**

Monitoreo en tanques 12'Øx12'

Se dosificó Cianuro de Sodio en cada tanque para intentar mantener la fuerza de cianuro libre de 0.5%, la cual no se logró por el alto contenido de fierro disuelto.

Tabla 2.8: Leyes de Oro y fierro en los Tanques

Tiempo hr	Tanque 1			Tanque 2			Tanque 3		
	Au	Fe	Rec. Au	Au	Fe	Rec. Au	Au	Fe	Rec. Au
	g/m ³	g/m ³	%	g/m ³	g/m ³	%	g/m ³	g/m ³	%
0	23.82	335	31.83	19.14	2,615	25.58	9.00	3,500	12.03
12	36.25	983	48.44	29.92	3,045	39.98	19.14	4,265	25.58
24	39.12	2,171	52.28	44.54	3,050	59.52	27.34	4,327	36.54
48	43.60	4,615	58.27	44.70	5,000	59.74	35.30	5,760	47.17
72	43.65	4,175	58.33	45.45	5,330	60.74	39.36	5,335	52.60
96	43.68	4,500	58.37	45.36	6,005	60.62	39.25	6,610	52.45

La tabla 2.8, indica los altos niveles de fierro y la baja recuperación de oro.

Consumo de reactivos

En la tabla 2.9; se indica los consumos de reactivos de la prueba.

Tabla 2.9: Consumo total de reactivos

Reactivo	Consumo Kg/tms
Cianuro de sodio	179.85
Cal viva	54.98
Nitrato de Plomo	0.50

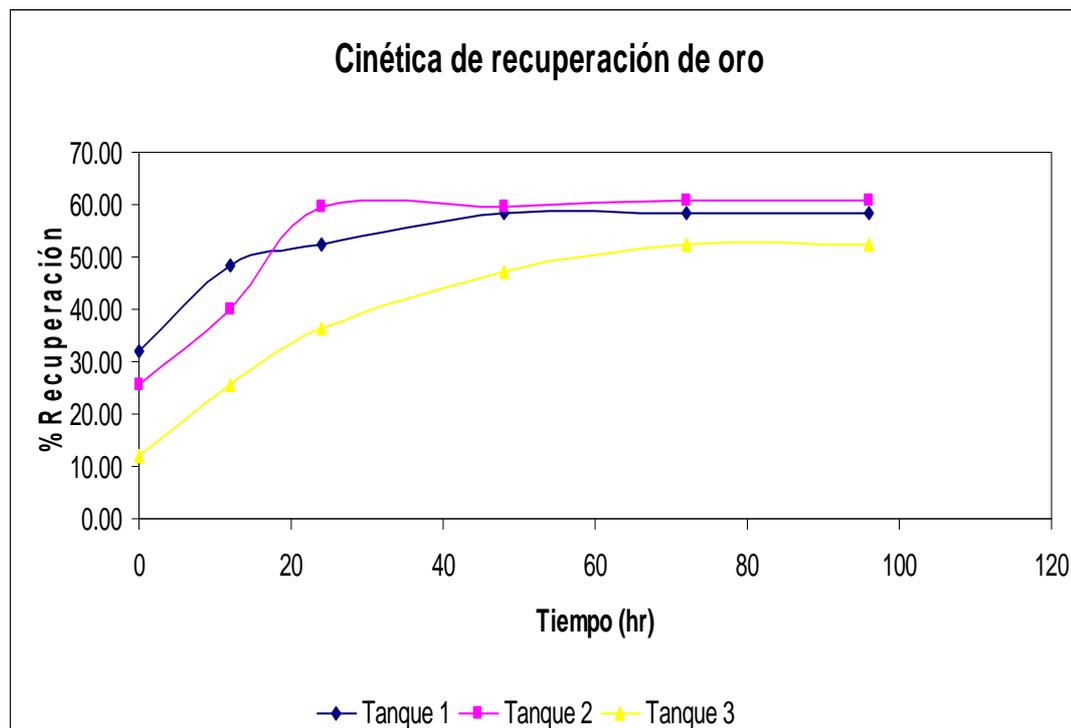


Figura 2.17: Cinética de recuperación de oro

La figura 2.5; indica las bajas recuperaciones de oro llegando a una recuperación máxima de 61% aplicando la cianuración directa.

2.5.3 Prueba piloto de cianuración de concentrados de flotación con etapa previa de oxidación en medio alcalino

De acuerdo a la baja recuperación de oro y altos consumos de reactivos aplicando la cianuración directa, se efectúa una prueba de oxidación de los concentrados en medio alcalino.

- **Procedimiento experimental**

Para esta prueba fue necesario preparar un sistema de difusión de aire dentro de un tanque agitador 12'Øx12' de tal manera que en su base se coloque una tubería

de 2"Ø, en forma de círculo con pequeños orificios para distribuir el aire proveniente de un blower URAI 65 que provee nominalmente 492.0 pies³ de aire /min.

Se tomó un lote de 11.74 tms de concentrado el cual es almacenado en una tolva, que alimenta de manera continua mediante una faja transportadora a un molino de bolas 6'Øx6' donde el concentrado es remolido. El producto del molino es enviado a un tanque agitador 12'Øx12', donde se realiza la oxidación y posteriormente la cianuración. La oxidación se realiza inyectando aire a baja presión desde un blower a la pulpa, nitrato de plomo y cal para mantener un pH entre 10.0 - 10.5. Para finalizar el proceso se añade carbón activado (CIP) para extraer el oro en solución.

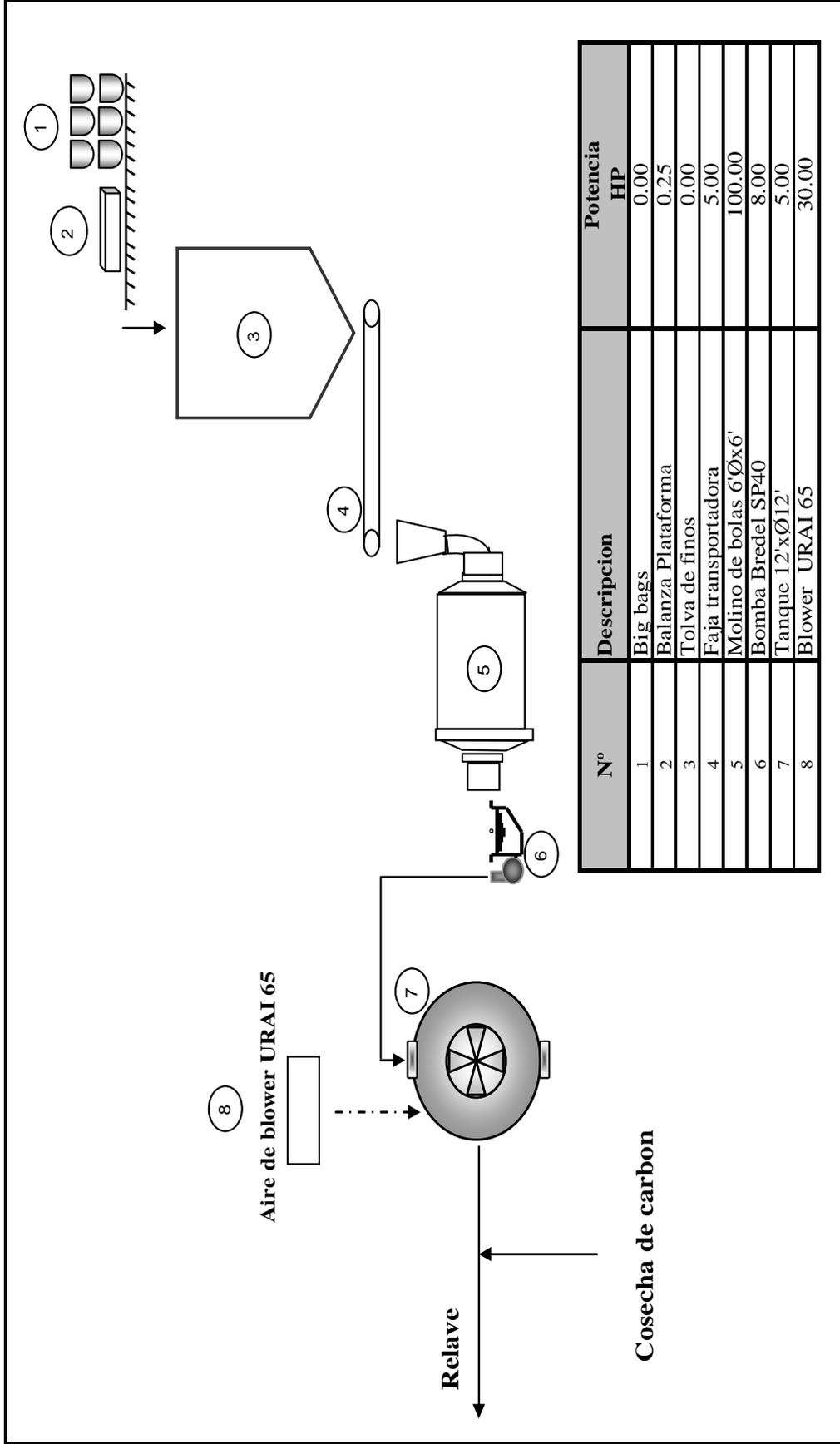


Figura 2.18: Diagrama de prueba piloto de cianuración de Concentrados de Flotación con pre-oxidación en medio alcalino

- **Condiciones metalúrgicas**

Las condiciones metalúrgicas para realizar las pruebas se indican en las tablas siguientes:

Tabla 2.10: Condiciones de la oxidación con cal

Oxidación con cal		
Detalle	Unidades	Tanque
Peso seco	tms	11.74
Granulometría	%-malla 400	94.10
% Sólido	%	32.76
Tiempo	hr	75.00
pH final	-	10.50
Oxígeno	ppm	4.95
CaO	Kg/t	41.73
Nitrato de Plomo	Kg/t	0.50

Tabla 2.11: Condiciones de la cianuración

Cianuración		
Detalle	Unidades	Tanque N° 1
Peso Seco	tms	11.74
% Sólido	-	32.76
Tiempo	hr	96.00
NaCN (libre)	ppm	1,500
pH	-	11.00
Oxígeno	ppm	5.20
CaO	Kg/t	0.00
NaCN	Kg/t	46.01

- **Resultados**

Los niveles de oxígeno disuelto en la pulpa aumentan a medida que la temperatura disminuye, como se puede apreciar en la tabla siguiente:

Tabla 2.12: Monitoreo de la etapa de oxidación con cal

Tiempo (hr)	pH	O ₂ ,ppm	T °C	g.Au/m ³	g.Fe/m ³
0.00	3.65	0.10	38.00	0.48	0.10
2.00	7.00	0.30	36.10	0.94	0.16
8.00	7.30	0.48	33.50	0.65	0.49
14.00	7.40	0.84	33.20	0.79	0.91
20.00	8.00	0.65	34.00	0.75	0.16
26.00	8.20	0.92	32.00	0.41	1.70
32.00	8.70	1.21	29.40	1.66	0.13
38.00	8.90	1.25	27.12	0.34	0.03
44.00	9.20	1.26	26.70	0.41	1.70
50.00	8.60	2.35	24.99	1.61	0.11
56.00	9.40	3.12	24.66	0.49	0.44
62.00	10.22	4.92	23.50	2.32	5.85
68.00	10.50	4.85	22.20	0.44	15.10
75.00	10.50	4.95	22.20	0.22	26.52

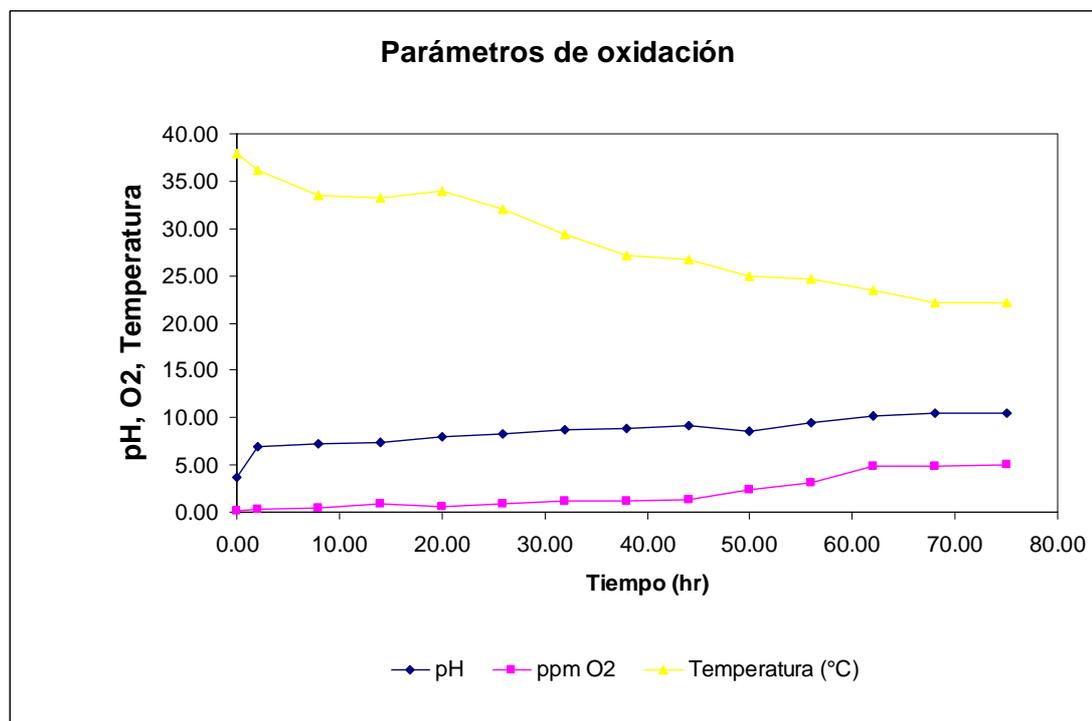


Figura 2.19: Parámetros de oxidación con cal

- **Monitoreo de la etapa de cianuración**

La recuperación de oro en la cianuración logra obtener superar el 90%, como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 2.13: Monitoreo de la etapa de cianuración

Tiempo (hr)	pH	%NaCN	O ₂ , ppm	g.Au/m ³	g.Fe/m ³	%Rec.Au
0.00	10.50	0.00	4.95	0.22	26.52	0.40
4.00	11.05	0.17	3.40	33.10	5.20	59.60
10.00	10.43	0.15	3.30	35.60	6.73	64.10
16.00	10.64	0.14	3.20	43.30	70.20	77.96
22.00	10.60	0.16	3.10	44.70	77.00	80.48
39.00	10.60	0.15	3.00	48.70	95.30	87.68
42.00	11.22	0.15	3.50	48.30	96.60	86.96
48.00	10.51	0.12	3.40	47.40	101.16	85.34
66.00	10.70	0.12	3.20	47.58	85.00	85.67
72.00	11.00	0.15	3.30	48.24	87.00	86.86
78.00	10.85	0.16	3.80	49.90	90.60	89.85
84.00	10.80	0.10	3.80	49.80	93.50	89.67
90.00	10.70	0.12	5.60	49.70	93.00	89.49
96.00	10.67	0.15	5.40	50.10	95.00	90.21

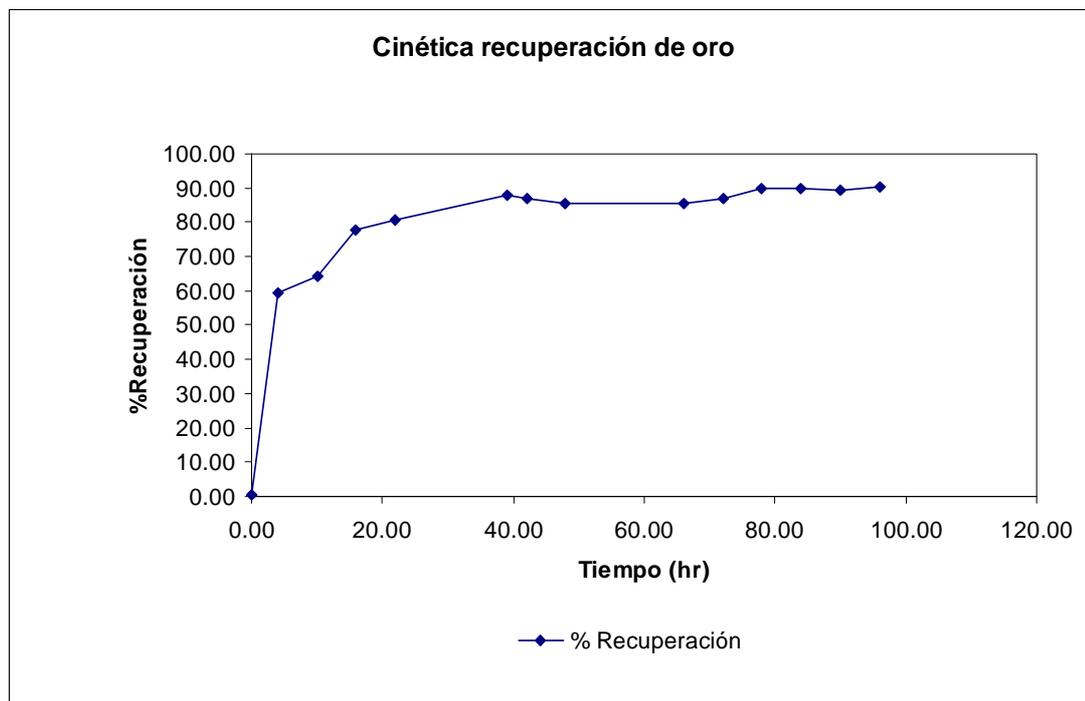


Figura 2.20: Cinética de recuperación de oro

- **Consumo de reactivos**

Los consumos de reactivos de prueba piloto se aprecian en la tabla siguiente:

Tabla 2.14: Consumo de reactivos

Reactivo	Consumo Kg/tms
Cianuro de sodio	46.01
Cal viva	41.73
Nitrato de Plomo	0.50

- **Análisis por difracción de Rayos X**

En la tabla 2.16; se puede apreciar los porcentajes de las especies formadas al inicio y final de la oxidación con cal. Se aprecia la especie de Yeso (CaSO_4) que se forma después de 2 horas de oxidación.

Tabla 2.15: Comportamiento de las especies mineralógicas por horas durante la oxidación con cal

% Mineral	Tiempo de oxidación en medio alcalino por horas											
	0	2	4	8	16	24	32	40	48	56	64	72
Cuarzo	37.8	34.9	36.4	35.3	35.8	35.4	35.7	33.8	36.7	35.6	36.9	36.9
Epidolita	20.8	19.9	19.7	22.6	20.4	22.0	21.1	19.1	23.3	21.1	21.1	20.1
Goethita	11.2	9.5	8.3	7.9	8.4	8.6	7.5	8.7	8.1	8.2	8.4	8.1
Muscovita	10.1	9.2	9.5	7.4	8.2	8.0	8.6	9.5	7.7	9.1	9.7	11.0
Pirrotita	5.9	8.2	8.6	8.1	8.0	8.8	7.5	8.0	7.2	8.0	7.7	7.4
Albita	5.5	4.0	4.8	4.3	3.8	2.5	5.1	2.7	3.3	4.1	3.8	4.0
Microclina	4.4	5.4	4.5	4.7	5.1	5.7	4.4	6.1	5.3	4.8	4.7	4.6
Marcasita	2.0	1.9	1.9	1.6	1.8	1.6	1.8	1.7	1.6	1.3	1.3	1.3
Biotita	1.2	0.5	1.2	1.7	1.2	1.7	1.4	1.5	1.5	2.1	1.5	1.5
Clinocloro	1.1	2.8	0.4	0.8	2.4	0.4	1.8	2.1	0.5	0.5	0.4	0.8
Yeso	0.0	3.9	4.8	5.6	5.0	4.3	5.2	6.9	4.8	5.2	4.7	4.5

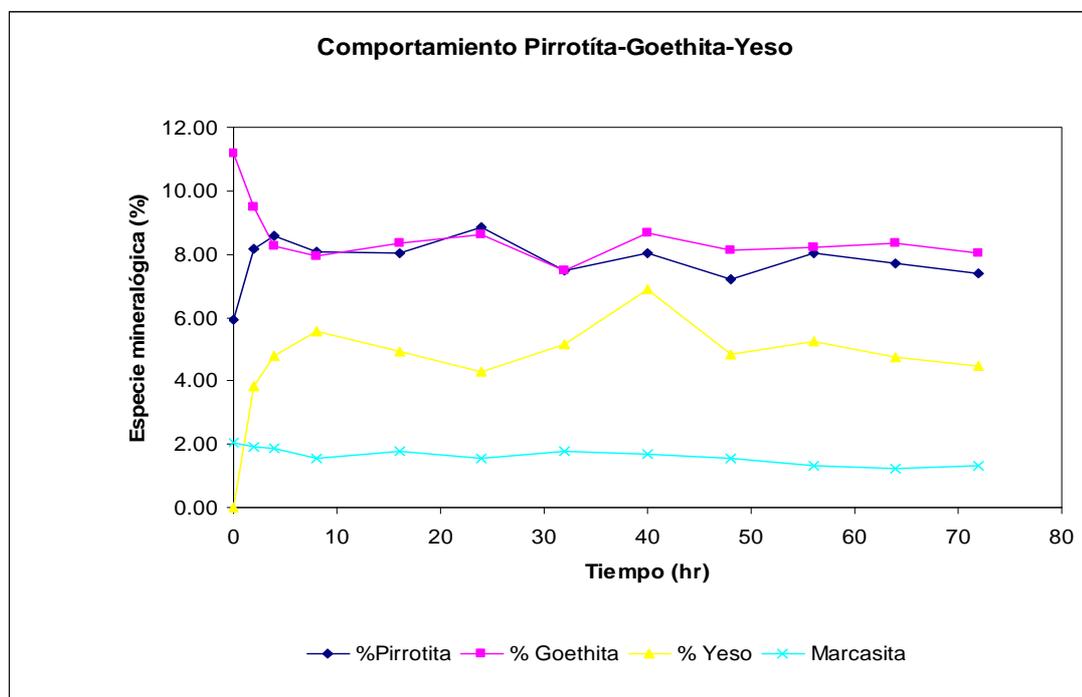


Figura 2.21: Comportamiento de las especies mineralógicas durante la oxidación con cal

2.5.4 Pruebas de cianuración de los concentrados de Flotación con etapa previa de oxidación en medio ácido

Teniendo en cuenta los resultados de la oxidación en medio alcalino y cianuración directa, se realiza un grupo de pruebas de oxidación en medio ácido que nos permita hacer el planteamiento final de tratamiento de los concentrados de flotación.

- **Procedimiento experimental**

Se realizaron tres pruebas piloto, con tres lotes de concentrado de 9.57; 10.32 y 9.91 tms. Primero el mineral es almacenado en una tolva, desde la cual se alimenta el mineral mediante una faja transportadora a un molino de bolas 6'Øx6'. La producto del molino es enviada a tres tanques agitadores 12'Øx12' de 30 m³ de capacidad. La inyección de aire en los tanques se realizó mediante lanzas que ayudan a remover con mayor eficiencia la pulpa desde el fondo del tanque. Se utilizó una compresora GA-315 para la inyección de aire.

La primera prueba consistió en oxidar la pulpa en el tanque y después bombearla hacia un Filtro de Prensa con el fin de eliminar la solución con gran cantidad de metales disueltos.

La segunda prueba consistió en eliminar la solución por decantación en el mismo tanque (lavado) donde se realizó la oxidación sin cal.

La tercera prueba se realizo de manera similar a la primera, pero con la inclusión de una etapa de lavado posterior a la filtración.

En general para las tres pruebas luego de la oxidación – filtración y/o lavado se prosiguió con la siguiente etapa de cianuración en el mismo tanque. Finalmente la recuperación se realizo por el método de Merrill Crowe.

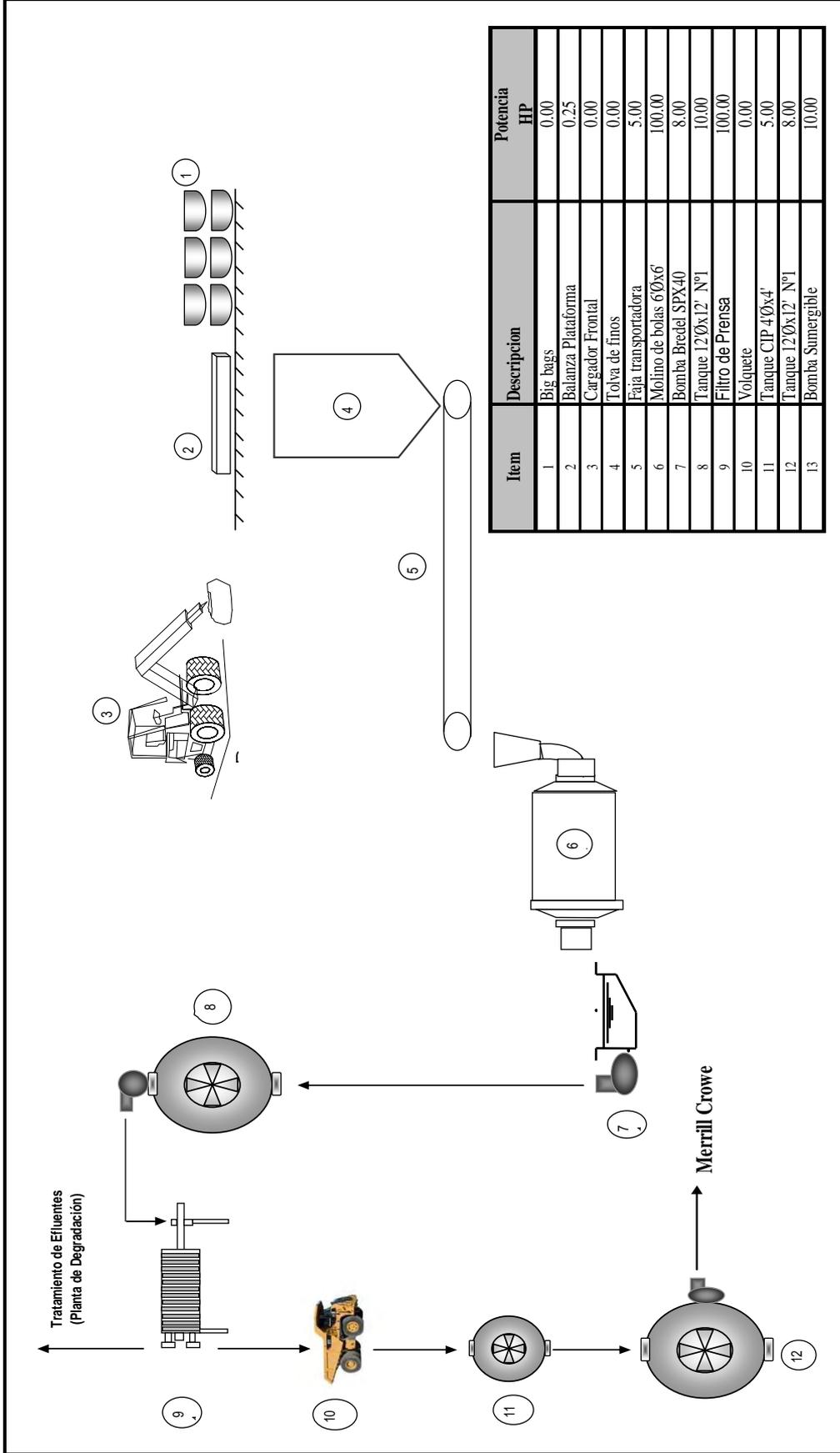


Figura 2.22: Diagrama de proceso de Prueba Piloto con oxidación en medio ácido con etapas de oxidación-filtración y/o lavado

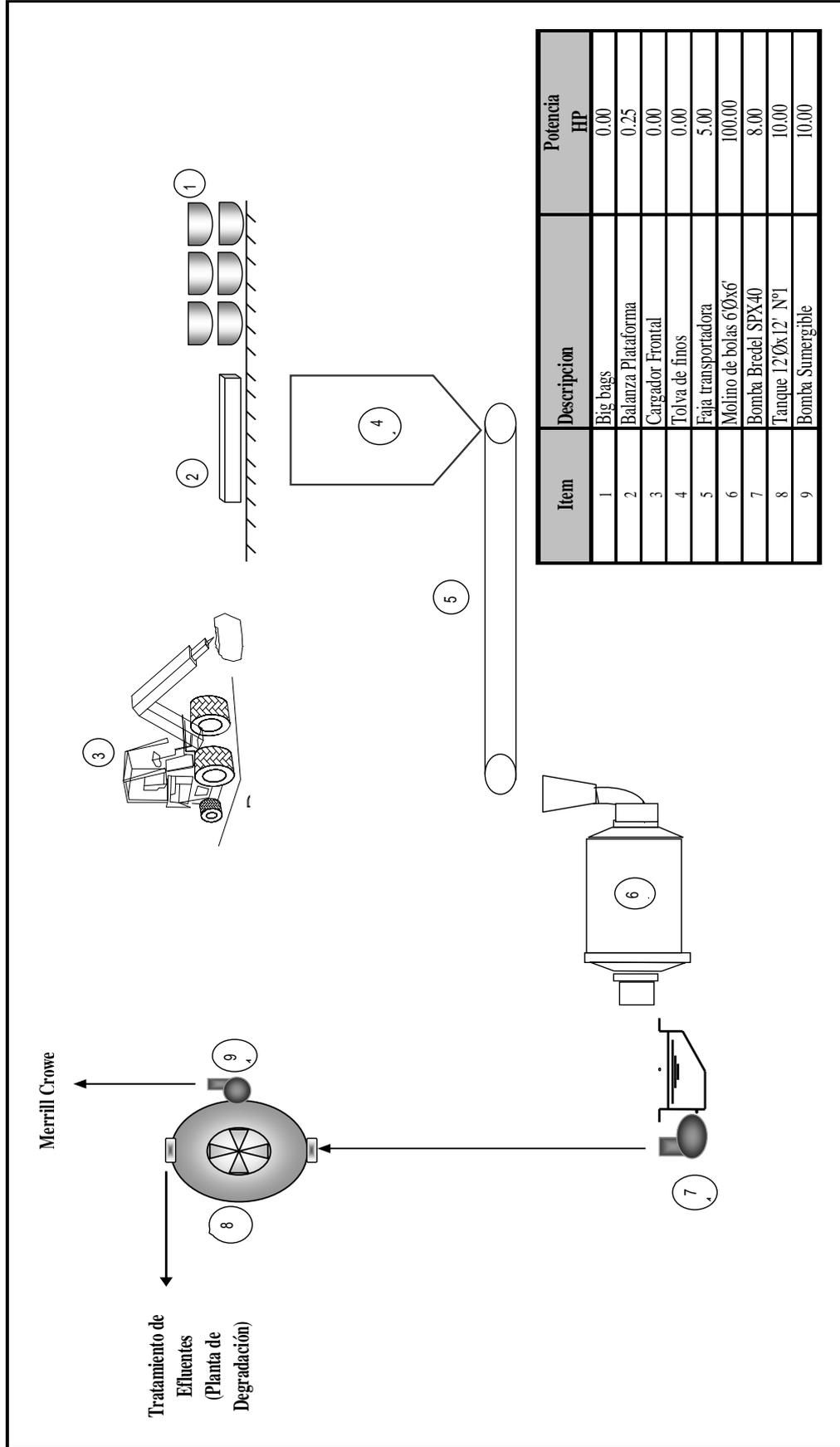


Figura 2.23: Diagrama de proceso de Prueba Piloto con oxidación en medio ácido con lavado

- **Condiciones metalúrgicas**

Las condiciones metalúrgicas de cada una de las tres pruebas de oxidación en medio ácido se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 2.16: Condiciones de oxidación en medio ácido

Oxidación sin cal				
Detalle	Unidades	Oxidación Filtración Cianuración	Oxidación Lavado Cianuración	Oxidación Filtración Lavado Cianuración
Peso seco	tms	9.57	10.32	9.91
Granulometría	%-malla 400	95.2	95.2	95.2
% Sólido	%	32.76	32.76	32.76
Tiempo	hr	75	57	81
pH final	-	2.3	4.3	2.75
Oxígeno	ppm	7	4.89	5.9
CaO	Kg/t	0.0	0.0	0.0
PbNO ₃	Kg/t	0.5	0.5	0.5

Tabla 2.17: Condiciones de filtración de las pruebas con oxidación en medio ácido

Filtración				
Detalle	Unidades	Oxidación Filtración Cianuración	Oxidación Lavado Cianuración	Oxidación Filtración Lavado Cianuración
Peso seco	tms	9.57	10.32	9.91
% Sólido	%	32.76	32.76	32.76
pH final	-	2.3	4.3	2.75
Oxígeno	ppm	7	4.89	5.9
CaO	Kg/t	0	0	0

Tabla 2.18: Condiciones de lavado de las pruebas con oxidación en medio ácido

Lavado				
Detalle	Unidades	Oxidación Filtración	Oxidación Lavado	Oxidación Filtración
		Cianuración	Cianuración	Lavado Cianuración
Peso seco	tms	9.57	10.32	9.91
% Sólido	%	32.76	32.76	32.76
pH final	-	11	11	11
Oxígeno	ppm	5.2	5.2	5.2
CaO	Kg/t	0	0	0

Tabla 2.19: Condiciones de Cianuración

Cianuración				
Detalle	Unidades	Oxidación Filtración	Oxidación Lavado	Oxidación Filtración
		Cianuración	Cianuración	Lavado Cianuración
Peso seco	tms	9.57	10.32	9.91
% Sólido	%	32.76	32.76	32.76
NaCN(libre)	ppm	1500	1500	1500
pH final	-	11	11	11
Oxígeno	ppm	4.4	4.25	4.85
CaO	Kg/t	31.35	34.65	20.23
NaCN	Kg/t	29.4	37.79	20.7

- Resultados**

Monitoreo de la tapa de oxidación sin cal-filtración

Los monitoreos de las etapas de oxidación en medio ácido se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 2.20: Monitoreo de etapa de oxidación-Filtración

Monitoreo de Oxidación-Filtración					
Tiempo (hr)	pH	O ₂ ,ppm	T °C	g.Au/m ³	g.Fe/m ³
0	4.8	0.1	38.9	0.0	1631.0
2	4.6	0.2	38.9	0.0	1745.0
8	4.6	0.3	38.8	0.0	1990.0
14	4.5	0.3	36.0	0.1	1976.5
20	4.5	0.2	35.9	0.0	1885.0
26	4.5	0.3	35.4	0.1	1970.0
32	4.5	0.2	36.1	0.0	1905.0
38	4.2	0.4	35.6	0.0	2020.0
44	4.2	0.4	34.8	0.1	2455.0
50	3.8	0.6	33.8	0.0	2635.0
56	2.2	2.4	31.8	0.0	3680.0
62	2.2	6.0	29.0	0.0	4680.0
68	2.3	6.5	27.8	0.0	5300.0
75	2.3	7.0	25.6	0.0	6380.0

Monitoreo de la etapa de Oxidación sin cal- Lavado

El monitoreo de la etapa de oxidación-lavado en medio ácido se detalla en la tabla siguiente:

Tabla 2.21: Monitoreo de etapa de Oxidación-Lavado

Monitoreo de Oxidación-Lavado					
Tiempo (hr)	pH	O ₂ ,ppm	T °C	g.Au/m ³	g.Fe/m ³
0	4.5	0.27	34.2	0.03	4650
6	4.5	0.57	32.6	0.03	4490
9	4.5	0.55	33.5	0.03	4350
12	4.4	1.10	34.9	0.04	4460
21	4.3	1.27	33.5	0.04	4410
27	4.4	2.15	33.7	0.03	4580
33	4.4	2.17	32.3	0.03	3940
39	4.4	2.72	31.6	0.06	6580
45	4.4	3.45	29.6	0.06	6460
51	4.2	4.51	30.2	0.03	6540
57	4.3	4.89	28.9	0.03	7000

Monitoreo de la etapa de Oxidación sin cal- Filtración-Lavado

El monitoreo de la etapa de oxidación-lavado en medio ácido se detalla en la tabla siguiente:

Tabla 2.22: Monitoreo de etapa de Oxidación-Lavado-Filtración

Monitoreo de Oxidación-Filtración-Lavado					
Tiempo (hr)	pH	O ₂ ,ppm	T °C	g.Au/m ³	g.Fe/m ³
0	4.3	0.70	34.8	0.03	1860.00
6	4.1	1.40	32.5	0.03	2640.00
9	4.4	1.50	33.7	0.03	2810.00
12	4.2	1.82	29.9	0.03	2820.00
21	4.1	1.72	31.2	0.04	2690.00
27	3.2	2.17	30.4	0.03	3800.00
33	2.2	2.14	29.7	0.03	3950.00
39	2.7	3.20	25.5	0.03	4105.00
45	2.9	3.40	24.6	0.03	5182.00
51	2.9	3.50	23.7	0.03	6507.00
57	2.7	4.70	25.1	0.04	7507.00
63	2.9	6.50	23.7	0.04	7850.00
69	2.9	6.10	22.7	0.03	8001.20
75	2.8	6.20	21.9	0.03	8102.00
81	2.8	5.90	21.0	0.03	8050.00

La etapa de oxidación en medio ácido de las tres pruebas se comportaron de manera similar. Las pruebas reportan una pequeña cantidad de oro disuelto en la etapa de oxidación.

Monitoreo de cianuración con etapa previa de oxidación sin cal-filtración

El monitoreo de la etapa cianuración se detalla en la tabla siguiente:

Tabla 2.23: Monitoreo de cianuración con etapa previa de oxidación-filtración

Tiempo (hr)	pH	%NaCN	O ₂ ,ppm	T°C	g.Fe/m ³	g.Au/m ³	%Rec.Au
0	11.2	0.00	1.5	22.4	5.7	0.0	0.1
3	11.1	0.16	1.5	21.9	10.3	12.5	36.9
6	10.5	0.25	6.5	22.3	22.0	19.3	56.9
9	10.4	0.15	6.5	24.0	29.5	25.1	73.9
12	10.3	0.15	6.3	23.5	36.5	24.3	71.7
15	10.4	0.05	6.4	23.5	56.7	26.4	77.9
21	10.1	0.12	6.5	29.0	51.8	26.8	79.0
27	10.9	0.05	6.3	22.9	62.0	27.4	80.8
33	10.5	0.25	5.0	24.2	82.0	28.2	83.2
39	10.4	0.20	4.7	23.0	89.5	29.9	88.3
42	10.5	0.10	4.4	28.2	88.7	30.7	90.6

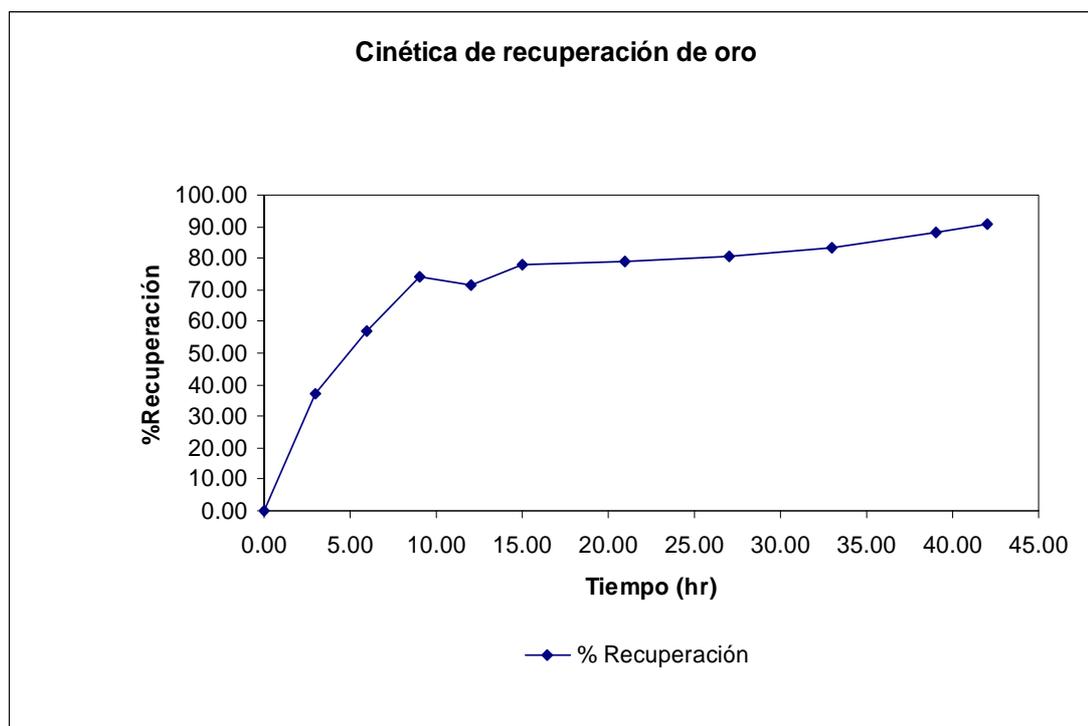


Figura 2.24: Cinética Recuperación de oro

Monitoreo de cianuración con etapa previa de oxidación sin cal-Lavado

El monitoreo de la etapa cianuración se detalla en la tabla siguiente:

Tabla 2.24: Monitoreo de la cianuración con etapa previa de oxidación-Lavado

Tiempo (hr)	pH	%NaCN	O ₂ ,ppm	T°C	g.Fe/m ₃	g.Au/m ₃	%Rec.Au
0	11.0	0.00	2.9	30.1	7.85	0.03	0.05
6	11.5	0.01	0.4	28.0	21.35	16.66	29.43
12	11.0	0.01	0.5	28.5	45.72	24.03	42.45
18	10.7	0.15	1.0	26.0	52.17	24.96	44.09
24	10.2	0.03	1.1	25.6	65.14	29.50	52.11
30	10.6	0.25	0.0	25.0	68.00	33.65	59.44
36	10.3	0.25	0.0	23.4	72.00	38.70	68.37
42	10.1	0.10	0.9	22.0	89.11	41.25	72.87
48	9.9	0.03	2.3	19.1	100.07	47.20	83.38
54	9.6	0.03	0.2	28.9	109.75	47.50	83.91
60	10.0	0.03	0.3	25.4	111.00	48.90	86.38

Monitoreo de cianuración con etapa previa de oxidación sin cal-Filtración y lavado

El monitoreo de la etapa cianuración se detalla en la tabla siguiente:

Tabla 2.25: Monitoreo de cianuración con etapa previa oxidación- filtración-lavado

Tiempo (hr)	pH	%NaCN	O ₂ ,ppm	T°C	g.Fe/m ³	g.Au/m ³	%Rec.Au
0	4.2	0.00	1.2	22.6	1.26	0.03	0.07
2	11.3	0.12	1.2	21.5	4.71	13.65	29.77
8	10.9	0.15	2.3	22.2	32.60	26.70	58.24
14	10.3	0.10	1.4	21.8	61.00	30.80	67.18
20	10.4	0.10	2.1	19.5	58.40	31.80	69.36
26	10.3	0.15	1.3	21.2	66.60	36.70	80.05
32	11.0	0.20	0.2	24.1	69.60	38.80	84.63
35	10.7	0.13	4.0	22.5	68.75	39.87	86.97
38	10.5	0.12	5.0	21.8	69.85	38.41	83.78
41	10.2	0.13	4.6	23.8	68.75	41.12	89.69
44	10.4	0.13	4.9	23.5	69.60	41.30	90.09

Las tres pruebas en su etapa de cianuración se comportan de manera similar, con una cinética rápida en las primeras horas.

Consumo de Reactivos

La diferencia de cada prueba radica en los consumos de reactivos resaltando la prueba de oxidación con etapa posterior de filtración y lavado.

El consumo de reactivos de cada prueba de oxidación en medio ácido, se detalla en la tabla siguiente:

Tabla 2.26: Consumo de reactivos con oxidación en medio ácido

Etapas	Oxidación Filtración Cianuración	Oxidación Lavado Cianuración	Oxidación Filtración Lavado Cianuración
Reactivo	Consumo Kg/tms	Consumo Kg/tms	Consumo Kg/tms
Cianuro de sodio	29.4	37.8	20.7
Cal viva	31.4	34.7	20.2
Nitrato de Plomo	0.5	0.5	0.5

2.5.5 Prueba piloto de determinación de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de los concentrados de flotación

Se realiza una prueba piloto para determinar la cantidad de oxígeno requerido en la etapa de pre-oxidación del concentrado de flotación.

- **Procedimiento Experimental**

La prueba se realizó con un lote de 14.10 tms de concentrado el cual es remolido en un molino de bolas 6'Øx6' en húmedo. El producto del molino es enviado a un

tanque 12'Øx12'.

Para esta prueba no se contó con un dispositivo que sea posible medir el caudal de aire de la Compresora, ya que esta suministra aire a la Planta y a la mina de manera simultanea.

La prueba se realizó inyectando oxígeno desde la Planta XORBOX que se utilizó exclusivamente para esta prueba, el cual posee las características siguientes:

- Marca: XORBOX
- Porcentaje de Pureza de oxígeno: 94.70%
- Capacidad: 10.1 m³/hr de oxígeno.

La pre-oxidación se realiza adicionando cal, nitrato de plomo e inyectando oxígeno durante 268.0 horas hasta obtener un nivel máximo de concentración de oxígeno disuelto en la pulpa de 6.2 mg/L. En estas mismas condiciones también se inyectó oxígeno en la etapa de cianuración.

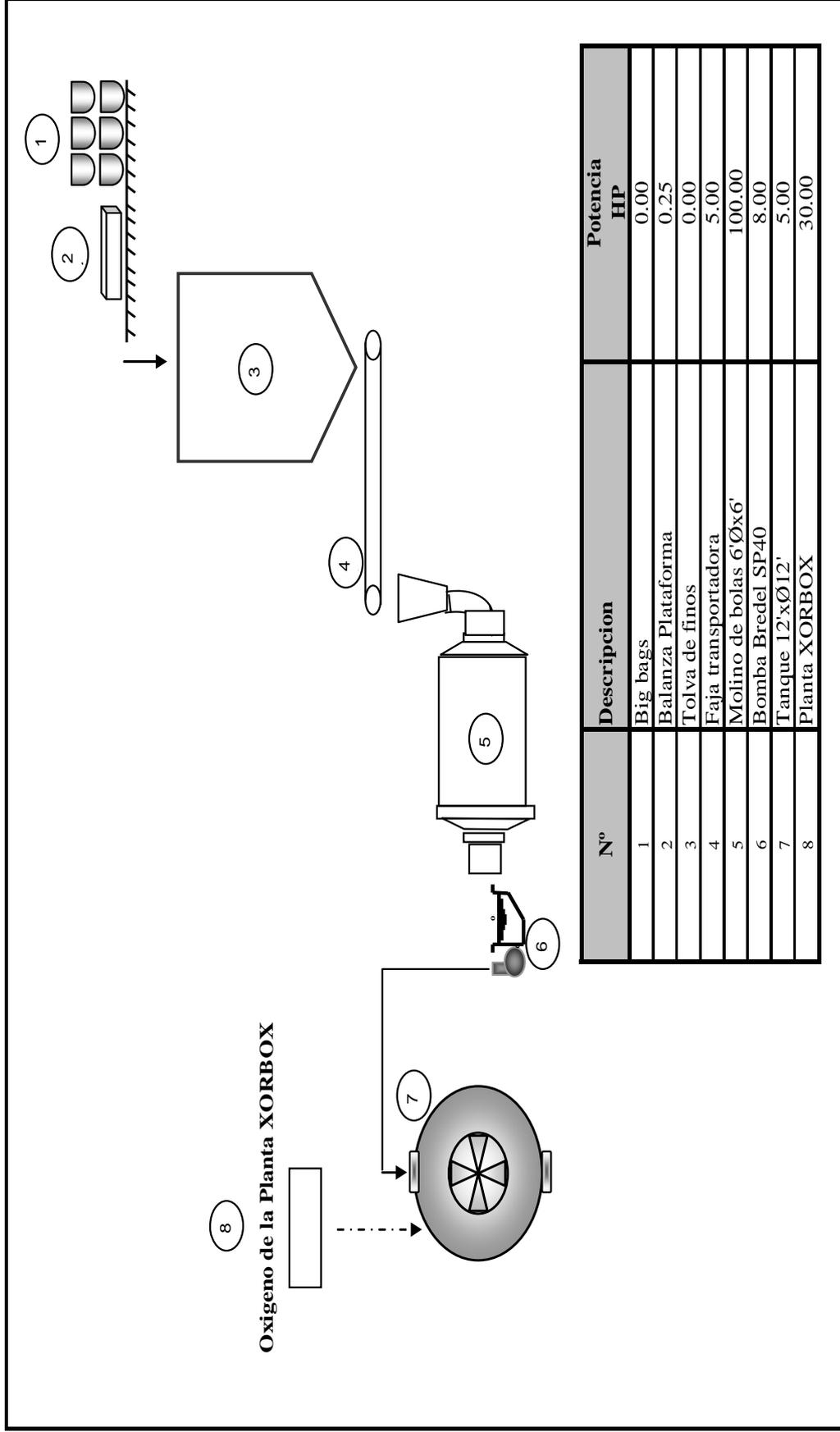


Figura 2.25: Esquema del proceso piloto para la determinación de la cantidad de oxígeno

- **Condiciones metalúrgicas**

Los parámetros de la prueba se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 2.27: Condiciones de la oxidación sin cal

Oxidación sin cal		
Detalle	Unidades	Tanque
Peso seco	tms	14.1
Granulometría	%-malla 400	97.6
% Sólido	-	38.3
Tiempo	hr	268.0
pH final	-	3.2
Oxígeno	ppm	6.2
PbNO ₃	Kg/tms	0.5

Tabla 2.28: Condiciones de cianuración

Cianuración		
Detalle	Unidades	Tanque
Peso seco	tms	14.1
% Sólido	-	38.32
Tiempo	hr	96
NaCN (libre)	ppm	1,500
pH	-	11.5
Oxígeno	ppm	4.7
CaO	Kg/t	21.36
NaCN	Kg/t	22.01

- **Resultados**

Para oxidar el concentrado de flotación fue requerido 2,563.0 m³ de oxígeno en un tiempo de 268 horas. El balance de oxígeno requerido al 94.7% de pureza se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2.29: Balance de de oxígeno requerido

Balance de Oxígeno requerido					
tms	O ₂ Requerido (m ³)	Tiempo (hr)	m ³ O ₂ /hr	m ³ O ₂ /hr/tms	m ³ O ₂ /tms
14.1	2,563	268	9.56	0.68	181.8

2.5.6 Pruebas de suministro y distribución de aire en dos tanques agitadores 20'Øx20' y uno de 17'Øx17' para la oxidación y cianuración de los concentrados de flotación

El concentrado de Flotación debe pasar por un proceso químico de oxidación previo a la cianuración, por tal motivo se determino el requerimiento de oxígeno de 181.77 m³O₂/tms de concentrado o su equivalente en aire de 865.59 m³aire/tms de concentrado.

La instalación de una Planta de oxígeno de 181.77 m³O₂/tms sería muy costosa y no suministraría una presión adecuada que permita romper la columna de la pulpa del tanque. Por está razón es necesario seleccionar una compresora de aire de baja presión y gran caudal que suministre aire suficiente para oxidar el concentrado de flotación que sea equivalente a una planta de oxígeno.

Se realizó 3 pruebas de suministro de aire y así verificar la compresora adecuada que produzca la total remoción de las partículas y pueda vencer la columna de pulpa de 1.30 Kg/L que posee cada tanque agitador.

Se utilizo tres tanques agitadores, dos de 20'Øx20' y uno de 17'Øx17', que contienen 60 y 40 tms de concentrado respectivamente. Para las prueba se utilizó un compresor de alta presión GA 315 de 300 HP y 1,300 CFM. La utilización del compresor es costoso ya que resta energía en forma de aire comprimido para las labores de perforación en la mina, además que la presión de diseño de este equipo

es de 120 PSI lo cual es demasiado para la operación de planta que solo necesita una fracción de presión para los tres tanques en operación.

- **Procedimiento Experimental**

La prueba consiste en aplicar aire a los tres tanques agitadores simultáneamente a una presión mayor o igual de 30 psi. La idea es observar la presión de entrada en las válvulas de cada tanque y ver el comportamiento de la agitación y difusión de aire.

De acuerdo a la agitación se podrá definir el compresor adecuado para este proceso:

- ZE 4 - I - 200 de 29 PSIG nominal y 1432 CFM
- ZE 4 - K - 200 de 29 PSIG nominal y 1619 CFM
- ZE 4 - VSD - 200 de 29 PSIG nominal y 1813 CFM

De no encontrar una eficiente agitación, probaremos a mayor presión lo cual nos hará cambiar de modelo.

Se realizó una instalación de tubería de 4"Ø desde la línea de aire que utiliza la mina hasta el pulmón alimentador a Planta con el fin de evaluar la compresora GA - 315 de mina tiene la capacidad de proporcionar aire a planta con una presión de 30 psi a más. Se realizaron varias pruebas con diferentes diámetros de tubería (2" Ø, 4" Ø y 6" Ø) hacia la línea que suministra aire a los tanques agitadores.

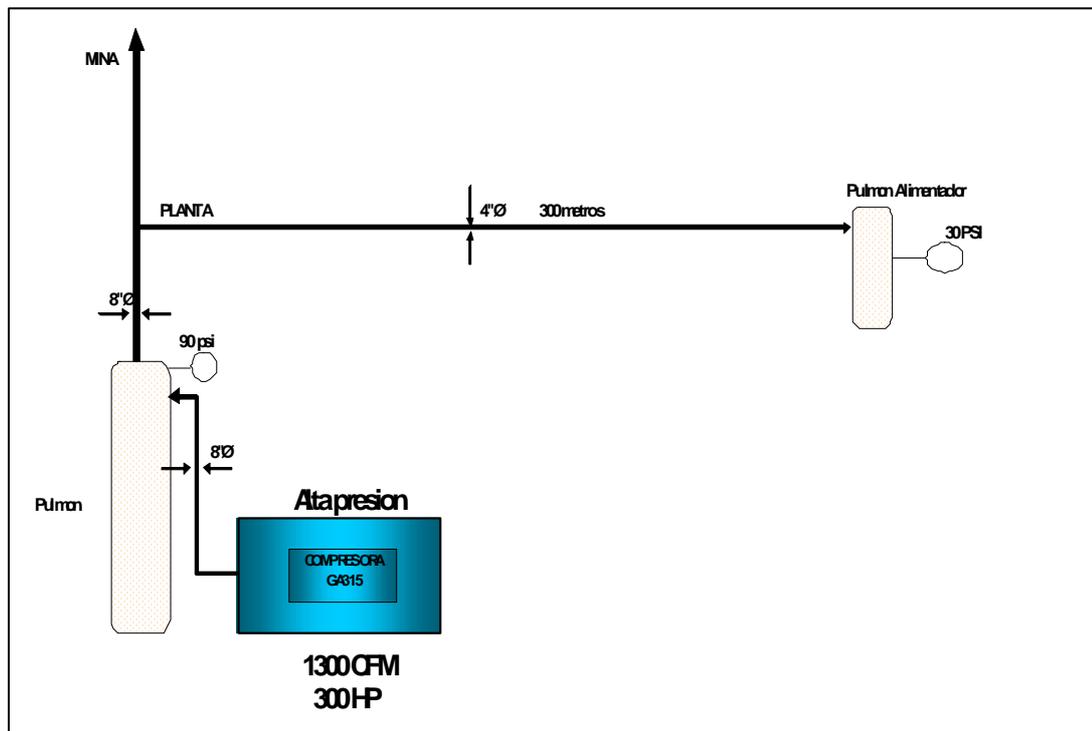


Figura 2.26: Esquema General de suministro de aire de mina a Planta

- **Pruebas de suministro de aire**

- **Prueba de suministro de aire con tubería de 6"Ø**

Para esta prueba se instaló una tubería de aire de 6"Ø que une la salida del pulmón alimentador de planta a la línea de distribución de aire de la siguiente manera:

La tubería de 4" Ø que sale desde mina, proporciona aire suficiente al Pulmón distribuidor de Planta llegando a una presión de 70 psi, la cual fue graduado hasta llegar a 30 psi. Se observó gran turbulencia en los tanques 20'Øx20' N°2 (sin presión en las lanzas) y 17'Øx17' (buena presión en las lanzas). El tanque 20'Øx20' N°1 no tubo turbulencia, lo que indica una mala distribución en la línea de aire ocasionando que baje la presión y no llegue aire al tanque 20'Øx20' N° 1. Otro problema se debe a las dimensiones de la línea de aire, el cual esta primero con

tubería 8"Ø que distribuye a la tubería 6"Ø a cada tanque, ocasionando que el aire llegue sólo a las circulinas.

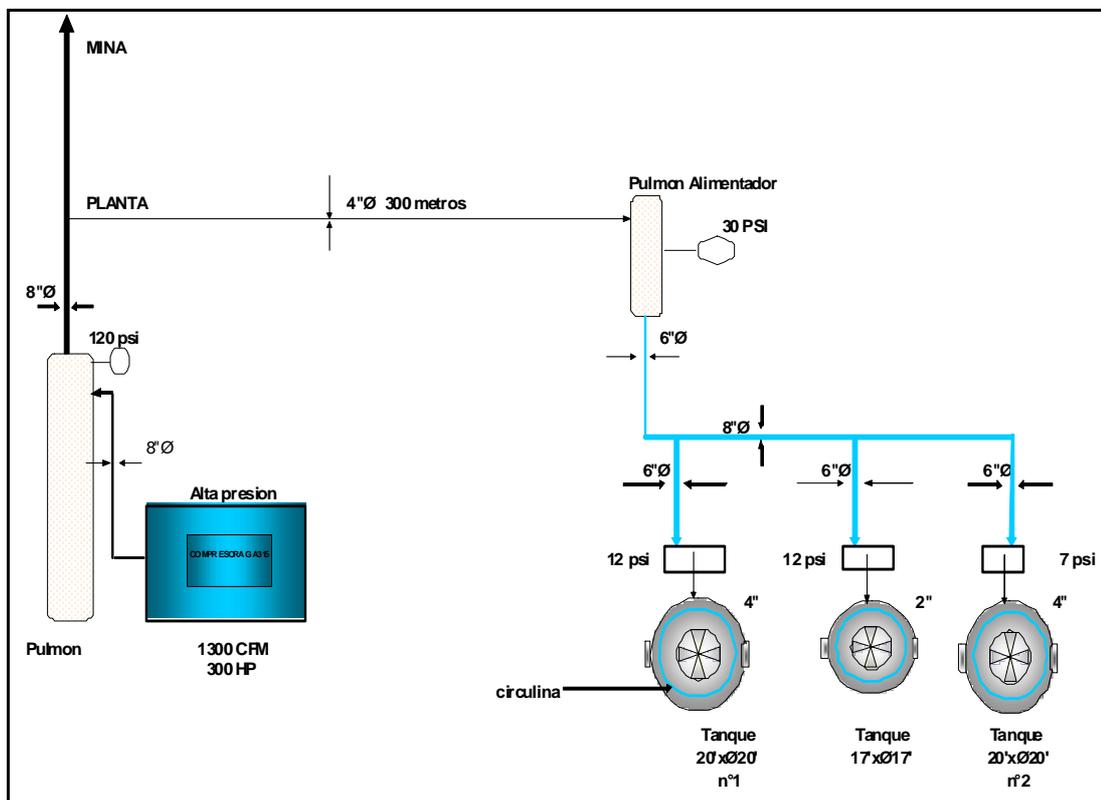


Figura 2.27: Esquema de distribución de aire utilizando tubería de 6"Ø

Prueba de suministro de aire utilizando tubería de 4" Ø

La prueba se realizó utilizando tubería de 4" Ø en la salida del pulmón alimentador de Planta. La presión baja a 25 psi, y lentamente en los tanques.

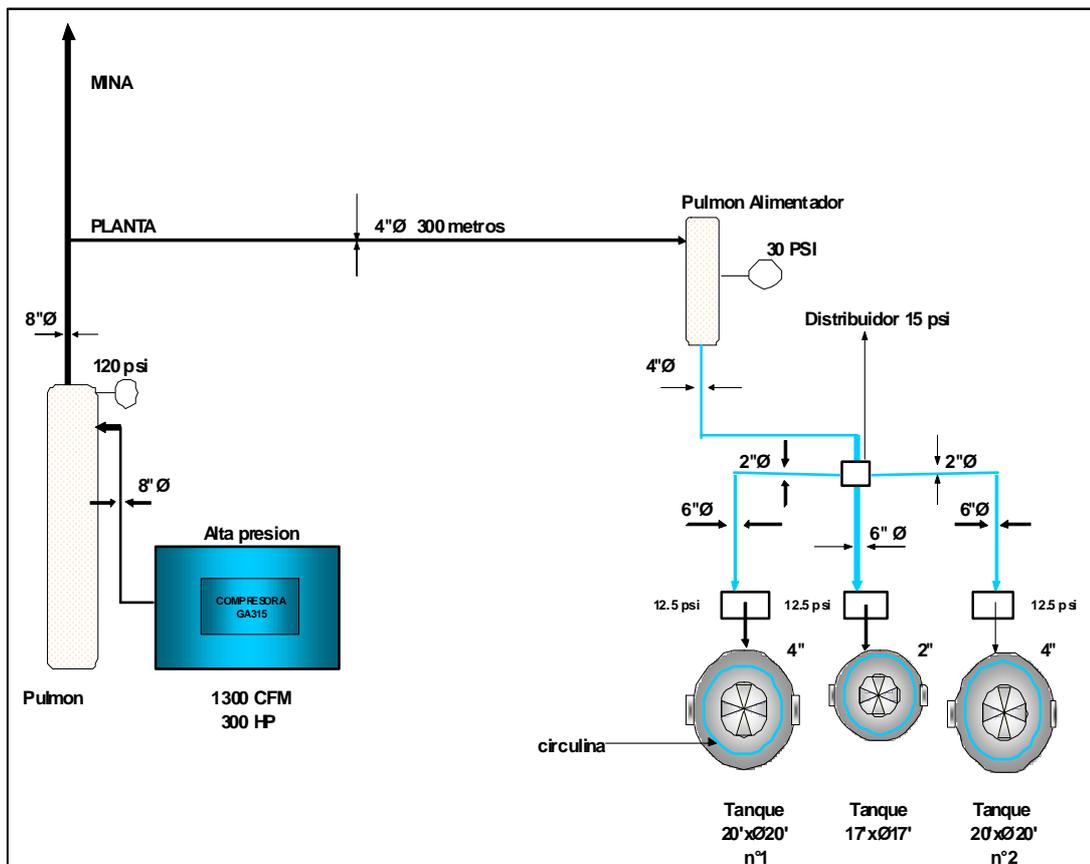


Figura 2.28: Esquema de distribución de aire utilizando tubería de 4" Ø.

Prueba de suministro de aire utilizando tubería de 3" Ø y de 2" Ø

Para esta prueba se utilizó una línea de aire de 3" Ø y de 2" Ø, a la salida del pulmón alimentador de planta que alimenta a su vez a un pulmón distribuidor (15 psi). Se observa buena turbulencia en los 3 tanques agitadores (12.5 psi) y no pierde presión en las circulinas y en las lanzas.

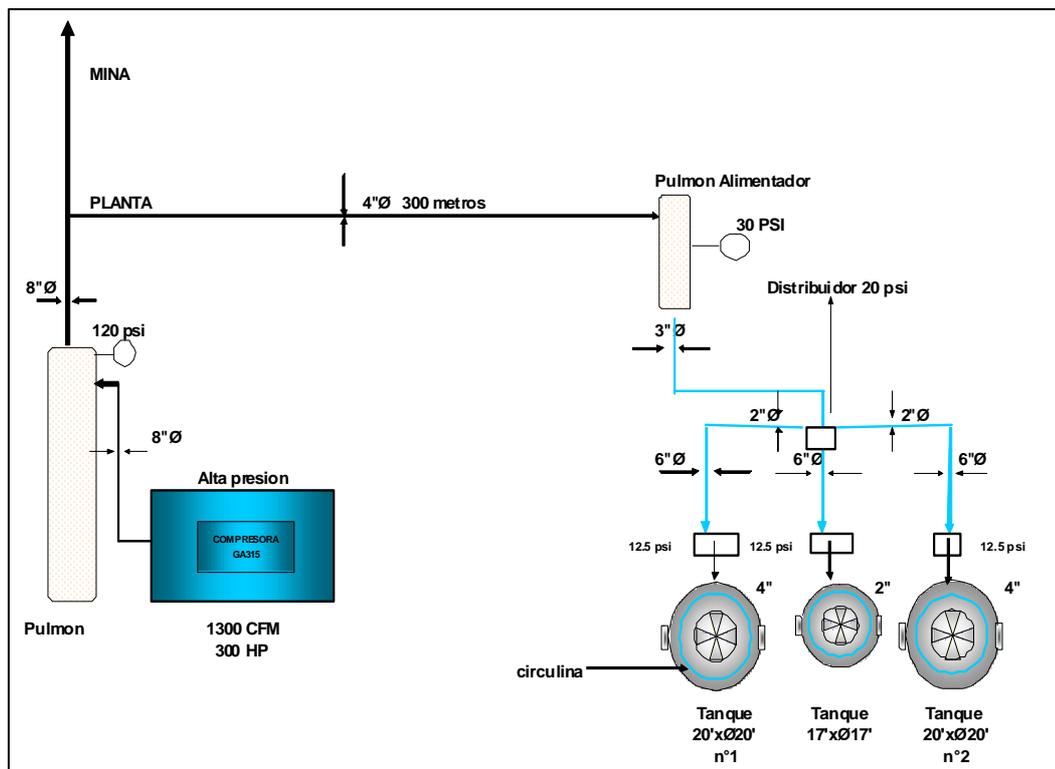


Figura 2.29: Esquema de distribución de aire utilizando tuberías de 3"Ø y 2"Ø.

Trabajando a una presión de 30 psi, se observa gran turbulencia en los 3 tanques, teniendo presión en las lanzas y circulinas. Con esta presión la válvula de alimentación a los tanques (pulmón alimentador) trabaja a 90% abierta. Es importante señalar que si se apertura mas la válvula, la pulpa dentro de los tanques comienza a rebalsar. En base a estos resultados la presión máxima de trabajo debe ser 12.5 psi para cada tanque.

Esquema propuesto de suministro de aire

Con los resultados de las pruebas de suministro de aire desde una compresora, se propone el siguiente sistema de suministro de aire de acuerdo a la figura siguiente:

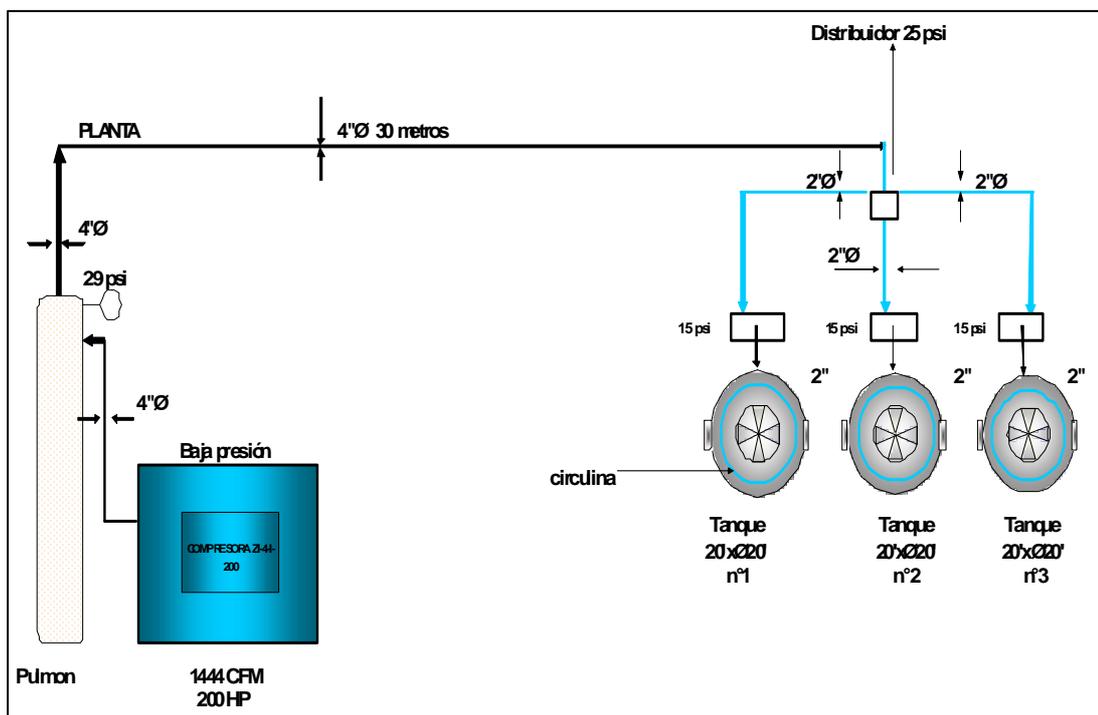


Figura 2.30: Esquema propuesto de suministro de aire

2.5.7 Prueba piloto de cianuración de concentrados gravimétricos con etapa previa de oxidación

Los concentrados gravimétricos poseen una ley en el rango de 800 a 2,000 gAu/tms y necesitan de un pre-tratamiento de oxidación antes de la cianuración. Este material por su gran cantidad de oro libre es más dócil que el concentrado de Flotación y no necesita de una etapa de filtración y/o lavado después de la pre-oxidación, es decir la cianuración se puede realizar en la misma solución de oxidación con cal. La recuperación de oro puede superar el 98.0 %.

- Procedimiento Experimental**

La prueba piloto consiste en moler un lote de 12.93 tms de concentrado gravimétrico en un molino de bolas 3'Øx3' batch. Es necesario realizar varias moliendas hasta completar la carga. El mineral molido en húmedo se envía a un tanque 12'Øx12'. La preoxidación se realiza inyectando aire y sales de plomo. Luego se inicia una lixiviación intensiva con cianuro a una concentración de 35,000 ppm (3.5% en CN libre) y pH de 11. El proceso se completa con el envío de la solución rica a Merrill Crowe en varias etapas de lavados (dependiendo de la ley de cabeza) en el mismo tanque.

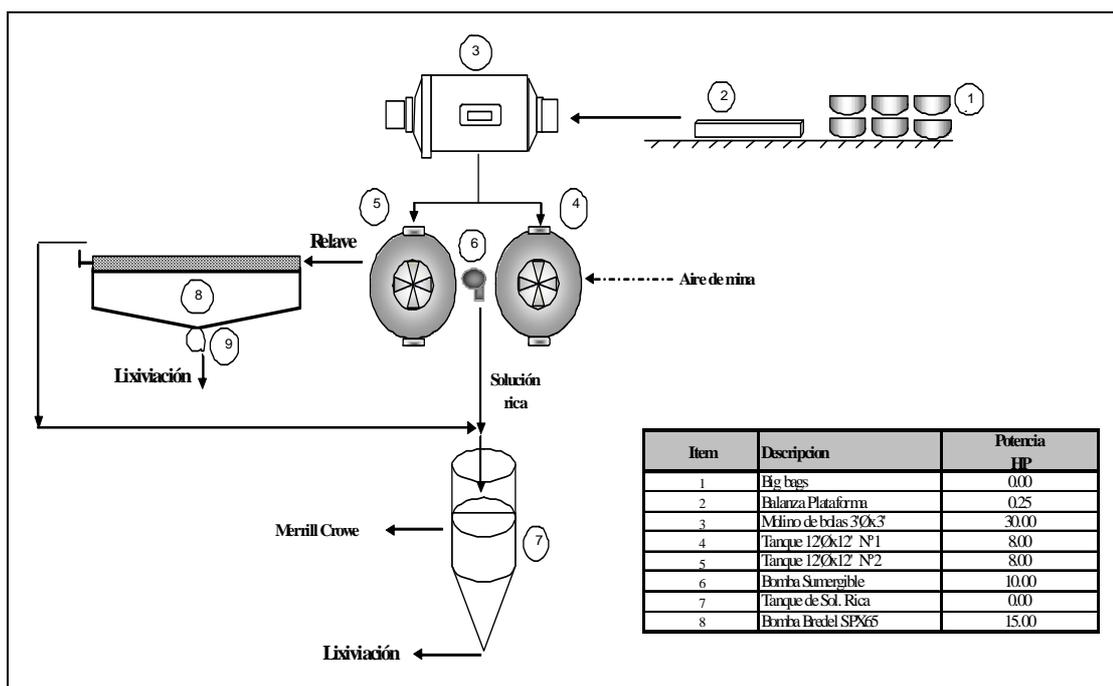


Figura 2.31: Esquema de proceso piloto de tratamiento de concentrado gravimétrico

- **Condiciones Metalúrgicas**

Las condiciones metalúrgicas de cada una de las etapas del tratamiento del concentrado gravimétrico se detallan en las tablas siguientes:

Tabla 2.30: Condiciones Metalúrgicas de la oxidación

Oxidación con cal		
Detalle	Unidades	Tanque
Peso seco	tms	12.9
Granulometría	%-malla 400	82.5
% Sólido	-	33.1
Tiempo	hr	24.0
pH inicial	-	5.5
pH final	-	9.8
Oxígeno	ppm	5.7
CaO	Kg/t	17.0
PbNO ₃	Kg/t	0.5

Tabla 2.31: Condiciones Metalúrgicas de la cianuración

Cianuración		
Detalle	Unidades	Tanque
Peso seco	tms	12.9
% Sólido	-	33.1
Tiempo	hr	48.0
NaCN (libre)	ppm	35000
pH	-	11.3
Oxígeno	ppm	6.0
CaO	Kg/t	17.0
NaCN	Kg/t	108.3

- **Resultados**

Monitoreo de la etapa de oxidación

La oxidación del concentrado gravimétrico es rápida y se observa disolución de oro producto del tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$).

Tabla 2.32: Monitoreo de la etapa de oxidación del concentrado gravimétrico

Tiempo (hr)	pH	O ₂ ,ppm	T °C	g.Au/m ³	g.Fe/m ³
0	5.5	0.5	26.8	0.03	0.12
4	7.5	1.3	25.5	0.03	0.15
6	9.5	3.5	26.8	0.03	0.56
12	7.6	4.5	25.5	0.12	0.45
18	9.9	5.1	26.8	0.51	0.51
24	9.8	5.7	24.8	3.41	0.11

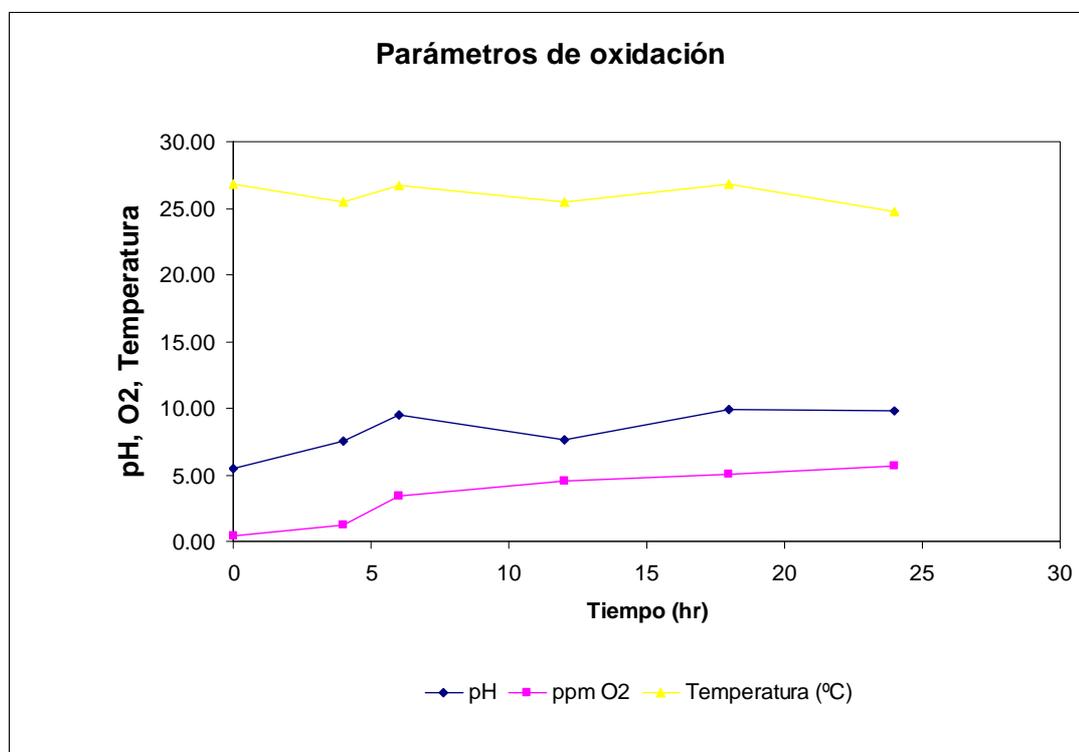


Figura 2.32: Parámetros de oxidación

Monitoreo de etapa de cianuración

La cianuración del concentrado gravimétrico es rápida en la primeras obteniendo una recuperación que supera el 98% de oro.

Tabla 2.33: Monitoreo de la etapa de cianuración

Tiempo (hr)	pH	%NaCN	O ₂ ppm	T°C	g.Fe/m ³	g.Au/m ³	%Rec.Au
0	9.8	0.0	5.7	24.8	0.1	3.4	0.8
3	11.1	3.5	5.3	24.7	171.5	85.0	19.6
6	11.3	3.4	5.5	24.1	293.0	113.0	26.0
9	11.3	3.3	6.6	25.1	372.0	145.5	33.5
12	11.2	3.3	5.6	25.2	436.0	186.3	42.9
15	11.3	3.1	5.7	25.7	488.0	187.0	43.1
18	11.3	3.5	5.7	25.6	574.0	222.5	51.3
21	11.5	3.5	7.2	25.4	588.0	254.0	58.5
24	11.5	3.5	6.2	26.0	598.0	273.0	62.9
27	11.5	3.3	6.0	25.1	878.0	276.5	63.7
30	11.5	3.2	6.1	25.4	950.5	288.5	66.5
33	11.5	3.2	6.2	26.7	1152.0	303.5	69.9
36	11.3	2.9	6.3	25.5	1206.0	295.0	68.0
39	11.6	2.8	5.7	25.4	1375.0	350.7	80.8
42	11.6	2.1	6.0	24.8	1601.0	410.5	94.6
45	11.5	3.5	6.0	24.9	1899.0	422.8	97.4
48	11.5	3.1	6.2	24.9	2005.0	426.5	98.3

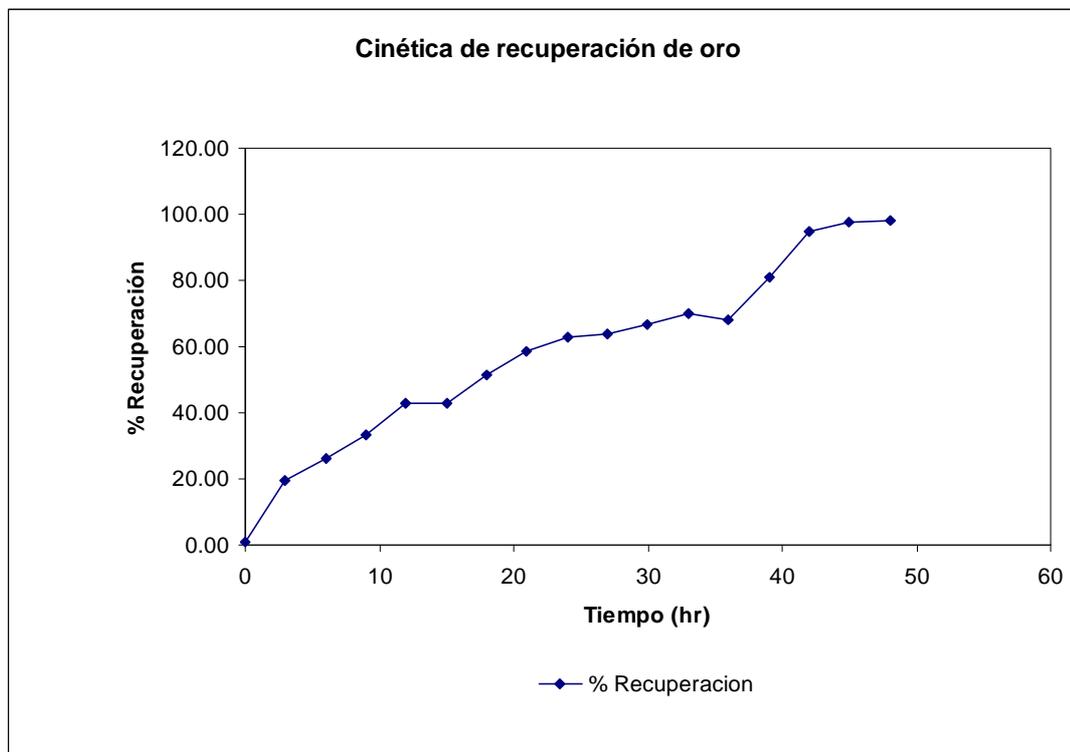


Figura 2.33: Cinética de Recuperación de oro

Consumo de reactivos del tratamiento del concentrado gravimétrico

El consumo de cianuro es elevado, sin embargo el proceso resulta factible por la alta ley del concentrado y oro recuperado. El consumo de reactivos se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2.34: Consumo de reactivos del concentrado gravimétrico

Nº	Reactivo	Consumo Kg/tms
1	Cianuro de Sodio	108.28
2	Cal viva	17.01
3	Nitrato de Plomo	0.5

CAPITULO III

EVALUACIÓN ECONÓMICA

Es necesario realizar un balance de materia con el fin de obtener el tonelaje de tratamiento, abastecimiento de agua, dimensiones de equipos para obtener los costos de inversión antes de realizar la simulación económica.

3.1 BALANCE DE MATERIA

Los tratamientos de los concentrados gravimétricos y flotación se proponen procesarlos por separado por su recuperación y diferencia en las leyes.

3.1.1 Concentrado de Flotación

El Balance de masa de los concentrados de Flotación para 30 tms/d se presenta en la siguiente figura:

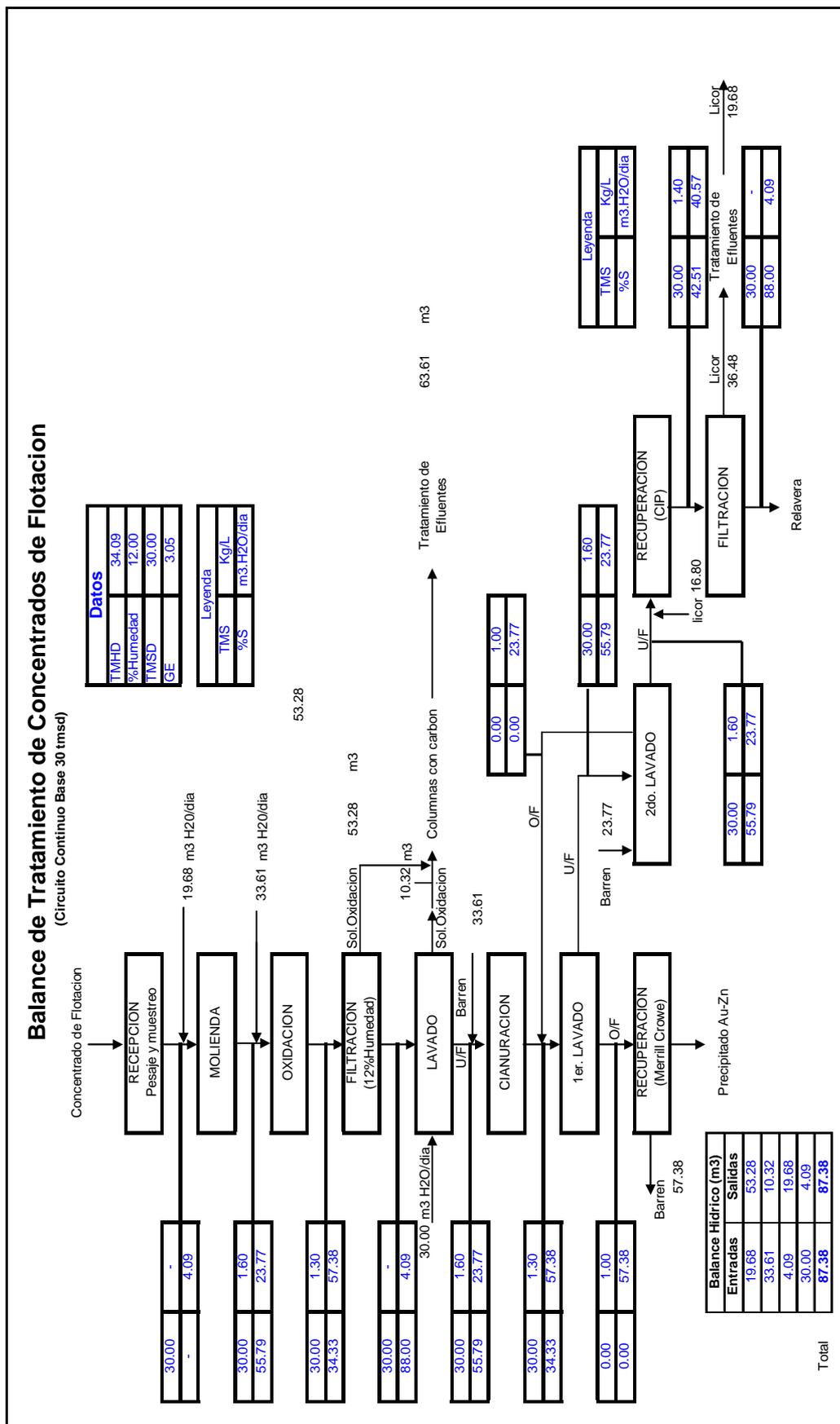


Figura 3.1: Balance de tratamiento de los concentrados de Flotación

3.1.1 Concentrado Gravimétrico

El Balance de masa de los concentrados de Gravimetría para 20 tms/mes se presenta en la siguiente figura:

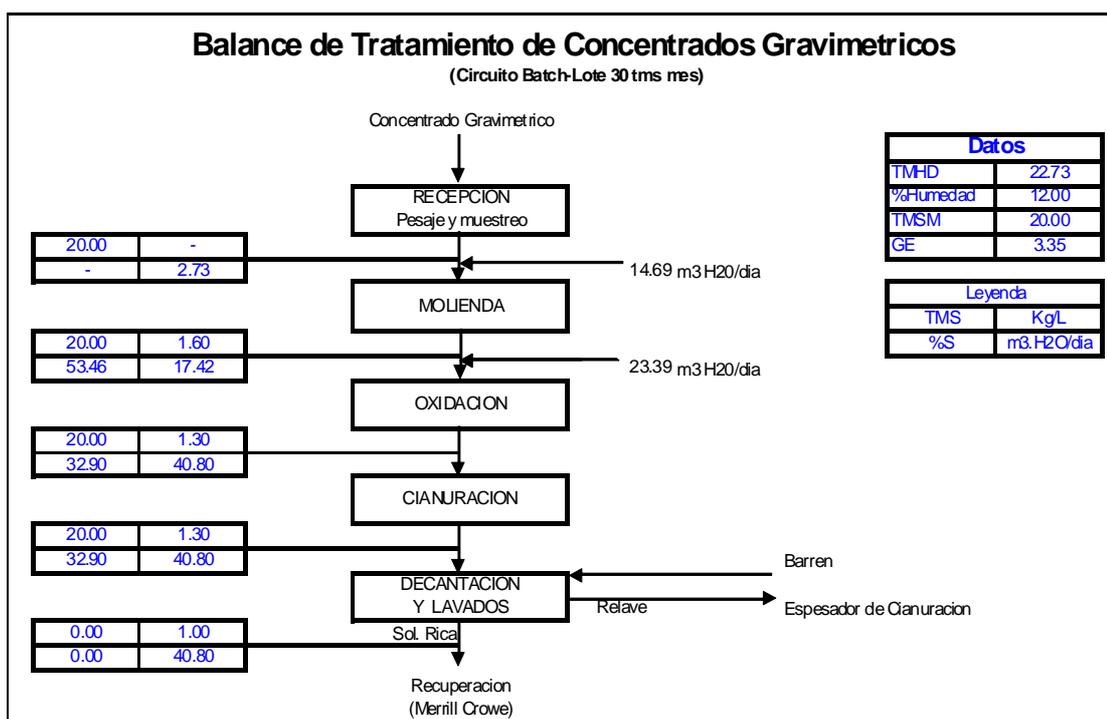


Figura 3.2: Balance de tratamiento de los concentrados gravimétricos

3.1.3 Flow Sheet propuesto para los tratamientos de concentrados pirrotíticos

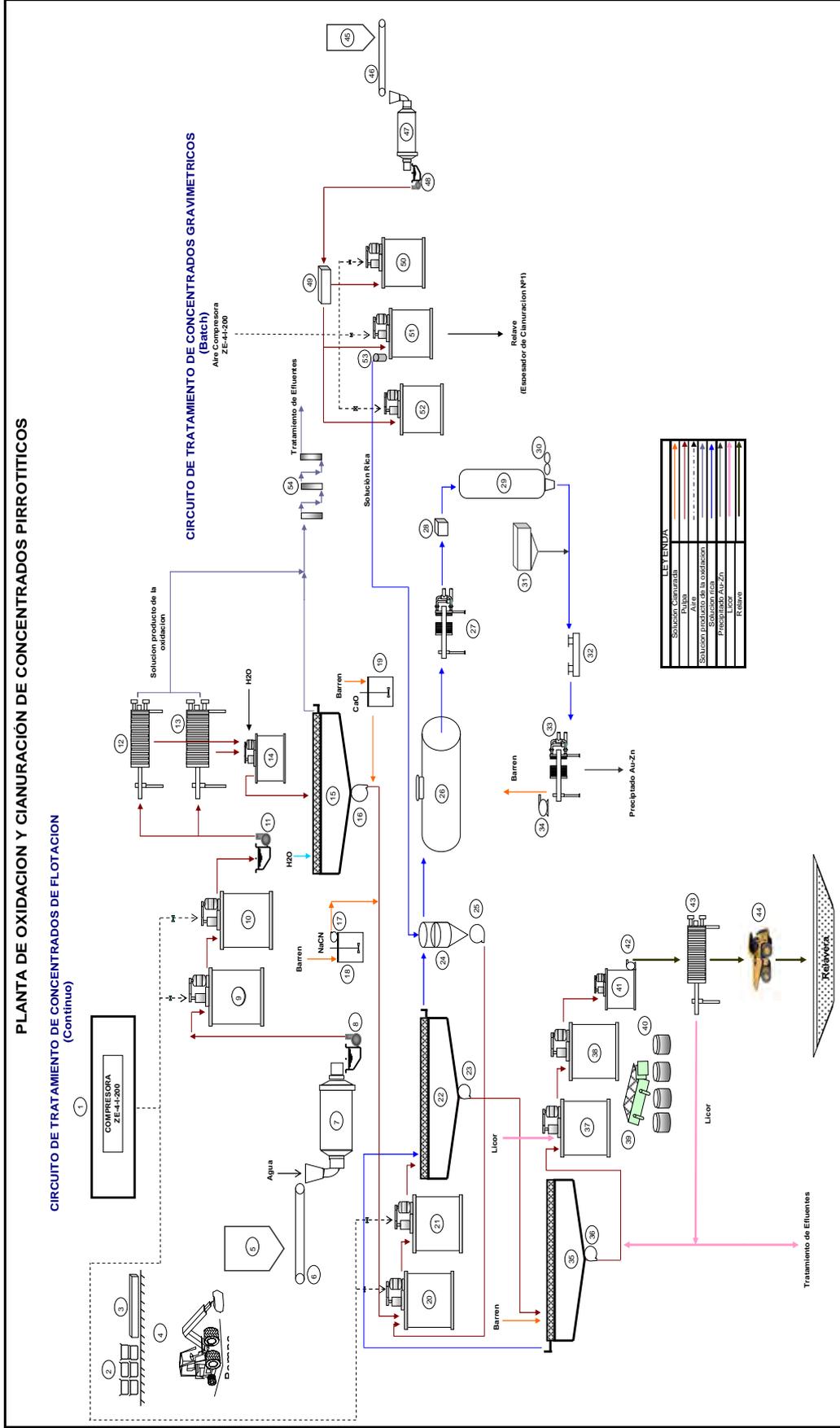


Figura 3.3: Flow Sheet de la Planta de oxidación y cianuración de concentrados pirrotíticos

El Tratamiento de los concentrados de Flotación, las principales etapas de la planta son las siguientes: Remolienda, oxidación sin cal, filtración, lavado, cianuración y recuperación mediante Merrill Crowe y CIP. Para el Tratamiento de los concentrados gravimétricos se considera las etapas de remolienda, oxidación con cal, cianuración y recuperación por Merrill Crowe. Los tratamientos de los concentrados de flotación se deben realizar de manera continua mientras para los concentrados gravimétricos por lotes (circuito batch). La planta esta diseñada para tratar 20 tms/mes (por lotes) de concentrado gravimétrico y 30 tms/d de concentrado de Flotación.

3.2 COSTOS DE INVERSIÓN

La instalación de la Planta debe estar acompañada de un laboratorio Químico-Metalúrgico, con el fin de monitorear los diferentes puntos del circuito y realizar investigaciones metalúrgicas para las mejoras del proceso.

3.2.1 Costos de Inversión de los principales equipos de Planta

Los equipos de Planta que se necesitan para la puesta en marcha de los tratamientos de los concentrados pirrotíficos, se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 3.1: Costos de inversión e instalación de equipos de Planta

Nº	Equipo Planta	Costo Equipo \$	Costo Instalación \$	Total Inversión \$
1	Compresora ZE-4-I-200	87,500.0	5,900.0	93,400.0
2	Patio de recepción	0.0	500.0	500.0
3	Balanza Plataforma - Cap. 2 ton.	1,340.0	0.0	1,340.0
4	Montacargas - Cap.4 ton.	45,000.0	0.0	45,000.0
5	Tolva de finos - Cáp. 50 ton.	20,000.0	12,000.0	32,000.0
6	Faja de Alimentación	22,000.0	3,000.0	25,000.0
7	Molino de bolas 4'Øx8' con trombell	120,000.0	10,000.0	130,000.0
8	Bomba Bredel SPX 32	8,000.0	0.0	8,000.0
10	Tanque agitador de oxidación 20'Øx20' Nº1	174,300.0	15,000.0	189,300.0
11	Tanque agitador de oxidación 20'Øx20' Nº2	174,300.0	15,000.0	189,300.0
12	Filtro de Prensa Nº1	68,000.0	12,000.0	80,000.0
13	Filtro de Prensa Nº2	68,000.0	12,000.0	80,000.0
14	Tanque agitador 10'Øx10'	25,000.0	5,000.0	30,000.0
15	Espesador 30'Øx10' Nº1	105,000.0	8,000.0	113,000.0
16	Bomba Bredel SPX 50	9,000.0	0.0	9,000.0
17	Bomba Bredel SPX 15	4,500.0	0.0	4,500.0
18	Tanque agitador 8'Øx10'	21,500.0	8,000.0	29,500.0
19	Tanque agitador 8'Øx10'	21,500.0	8,000.0	29,500.0
20	Tanque agitador de cianuración 20'Øx20' Nº1	174,300.0	18,000.0	192,300.0
21	Tanque agitador de cianuración 20'Øx20' Nº2	174,300.0	18,000.0	192,300.0
22	Espesador 30'Øx10' de cianuración Nº1	105,000.0	8,000.0	113,000.0
23	Bomba Bredel SPX 50	9,000.0	0.0	9,000.0
24	Tanque Sedimentador 10'Øx12'	12,000.0	5,000.0	17,000.0
25	Bomba Bredel SPX 32	8,000.0	0.0	8,000.0
26	Tanque de Solución rica 8'Øx12'	25,000.0	5,000.0	30,000.0
27	2 Filtro Clarificadores	80,000.0	2,000.0	82,000.0
28	Flujómetro	1,800.0	0.0	1,800.0
29	Torre de vacío	22,000.0	1,000.0	23,000.0
30	Bomba de vacío	6,000.0	0.0	6,000.0
31	Dosificador de zinc	2,500.0	0.0	2,500.0
32	Bomba de solución rica	8,500.0	0.0	8,500.0
33	2 Filtros precipitadores	100,000.0	2,000.0	102,000.0
34	Bomba de Solución barren	4,000.0	0.0	4,000.0
35	Espesador 30'Øx10' de cianuración Nº2	105,000.0	8,000.0	113,000.0
36	Bomba Bredel SPX 50	9,000.0	0.0	9,000.0
37	Tanque agitador CIP 20'Øx20' Nº1	174,300.0	18,000.0	192,300.0
38	Tanque agitador CIP 20'Øx20' Nº2	174,300.0	18,000.0	192,300.0
39	Zaranda de cosecha de carbón 4'x6'	6,800.0	500.0	7,300.0
40	Bidones de almacenaje de carbón	1,000.0	0.0	1,000.0
41	Tanque agitador 12'Øx12'	27,800.0	8,000.0	35,800.0
42	Bomba metso	10,000.0	0.0	10,000.0
43	Filtro de Prensa	68,000.0	12,000.0	80,000.0
44	Volquete -Cap. 20 ton	40,000.0	0.0	40,000.0
45	Tolva de finos - Cáp. 30 ton.	18,000.0	10,000.0	28,000.0
46	Faja de Alimentación	10,000.0	3,000.0	13,000.0
47	Molino de bolas 3'Øx4' con trombell	50,000.0	10,000.0	60,000.0
48	Bomba Bredel SPX 32	8,000.0	0.0	8,000.0
49	Cajón distribuidor cap. 1 m3	500.0	0.0	500.0
50	Tanque agitador de OX-CN 12'Øx12' Nº1	20,000.0	5,000.0	25,000.0
51	Tanque agitador de OX-CN 12'Øx12' Nº2	20,000.0	5,000.0	25,000.0
52	Tanque agitador de OX-CN 12'Øx12' Nº3	20,000.0	5,000.0	25,000.0
53	Bomba Sumergible	12,000.0	0.0	12,000.0
54	Columnas de carbón	5,000.0	1,000.0	6,000.0
Total		2,487,040.0	276,900.0	2,763,940.0

3.2.2 Costos de inversión de Equipos de laboratorio

Es necesaria la instalación de un laboratorio químico-metalúrgico con el fin de monitorear los principales puntos de la planta como la ley de cabeza, relave, soluciones del circuito, análisis de mallas, turbidez, etc. Los equipos necesarios se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 3.2: Costos de equipos e instalación de Laboratorio químico-metalúrgico

Nº	Equipos	Costo \$
1	Obras Civiles	30,000
2	Medidor de oxígeno disuelto	1,500
3	Medidor de pH portátil	1,000
4	Turbidímetro-medidor de turbidez en soluciones	500
5	3 Agitadores eléctricos para pruebas de lixiviación	6,000
6	Microscopio	1,200
7	Molino de Bond	11,250
8	Destilador de agua	1,600
9	Bomba de vacío para laboratorio.	1,000
10	Horno de Fundición	20,000
11	Equipo de absorción atómica	35,000
Total		109,050.00

En la tabla 3.3, se indica la inversión total para los equipos de Planta y Laboratorio.

Tabla 3.3: Inversión total de Planta y Laboratorio

Inversión total de equipos y maquinarias	Costo \$
Equipos Planta	2,763,940.00
Equipos Laboratorio Químico-Metalúrgico	109,050.00
Sub. total	2,872,990.00
Contingencias (10%)	287,299.00
Total	3,160,289.00

3.3 COSTO DE TRATAMIENTO

El costo de tratamiento incluye todos los gastos de reactivos, personal, energía y laboratorio durante un mes.

Tabla 3.4: Costos de tratamientos de concentrados pirrotífticos

Detalle	Concentrado Flotación		Concentrado Gravimétrico	
	Costo (us\$)	Costo Unitario (\$/t)	Costo (us\$)	Costo Unitario (\$/t)
Energía	3,238.8	3.6	1,181.2	1.3
Laboratorios	2,984.0	3.3	381.4	164.0
Reactivos	73,205.5	81.3	4,810.4	240.5
Personal	43,214.3	48.0	1,702.6	85.1
Total	122,642.7	136.3	8,075.6	490.9

3.4 COSTO DE PRODUCCIÓN

El costo de producción incluye los costos totales de tratamientos de los concentrados, así como los gastos administrativos (logística, transporte, etc).

Tabla 3.5: Costos de producción de concentrados pirrotífticos

COSTO TOTAL	COSTO (US\$)	(*) COSTO UNITARIO (US\$/t)
Tratamiento Flotación	122,642.7	136.3
Tratamiento Gravimétrico	8,075.6	490.9
Sub. Total	130,718.2	142.1
Gastos administrativos (10%)	13,071.8	14.2
Total	143,790.0	156.3

(*) El costo unitario de producción es el promedio ponderado de 900 tms de concentrado de flotación por mes y 20 tms de concentrado gravimétrico al mes.

3.5 FACTIBILIDAD DEL PROYECTO

Se realiza los balances metalúrgicos de producción de oro tomando como base un mes de operación de la planta.

3.5.1 Concentrado de Flotación

Se toma como base 900 tms/mes, como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 3.6: Balance metalúrgico de concentrado de flotación

tms	ley (g.Au/tms)	Rec.Au (%)	Finos Rec. (g.Au)	Onzas Rec.(oz)	Precio \$/oz	\$.mes
900.0	100.0	90.0	81,000.0	2,604.2	1,300.0	3,385,471.1

3.5.2 Concentrado Gravimétrico

Se toma como base 20 tms/mes, como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 3.7: Balance metalúrgico de concentrado Gravimétrico

tms	ley (g.Au/tms)	Rec.Au (%)	Finos Rec. (g.Au)	Onzas Rec.(oz)	Precio \$/oz	\$.mes
20	1,000.00	98	19,600.00	630.2	1,300.00	819,200.40

3.5.3 Producción total por mes

La producción total de oro en un mes, se indica en la tabla siguiente:

Tabla 3.8: Producción Total de oro

Finos Recuperados (g.Au)	Onzas Rec.(oz)	Precio \$/oz	\$.mes
100,600.00	3,234.40	1,300.00	4,204,671.50

3.5.4 Costo Total

El costo total incluye la instalación de la Planta, el costo de tratamiento y los costos de refinación realizada por una empresa externa que se encargara de procesar el precipitado Au-Zn.

Tabla 3.9: Costo total de la inversión

Detalle	Costo (\$)
Instalación de Planta	3,160,289.00
Costo de Tratamiento x mes	143,790.03
Costo de Refinación de Precipitado (10\$/oz)	32,343.63
Total	3,336,422.65

El costo total de tratamiento por mes y el costo por tonelada tratada de concentrado se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 3.10: Costo Total de Tratamiento

Detalle	Costo (\$)	Costo (\$/t)
Costo de Tratamiento x mes	143,790.0	156.3
Costo de Refinación de Precipitado (10\$/oz)	32,343.6	35.2
Total	3,336,422.7	191.5

Las utilidades obtenidas después de la puesta en marcha de la Planta, recuperarían la inversión al término del primer mes.

Tabla 3.11: Utilidades

Mes	Utilidades (\$)	Utilidades (\$/t)
Primer Mes	868,248.9	943.8
Después del Primer Mes	4,028,537.9	4,378.9

CONCLUSIONES

1. La composición química del mineral estudiado, reveló la presencia de importantes cantidades de Au con leyes superiores a los 100 g/t, lo cual hace del material ideal para su estudio en cianuración.
2. La utilización de nitrato de plomo permitió determinar su influencia en la oxidación, determinando la dosificación ideal de 0.5 Kg/tms, logrando un incremento en la recuperación de 0.6%. Este aumento en la recuperación justifica considerando que el tratamiento es de concentrados de alta ley.
3. Los beneficios de la adición de nitrato de plomo durante la oxidación es la eliminación de los iones de azufre en la solución por precipitación en forma de sulfuro de plomo minimizando la posibilidad de formación de la película de azufre en superficies de oro y plata, y la reducción de la formación de tiocianato en la etapa de cianuración. Disminuye la pasivación de superficies minerales reactivos debido a la deposición de un precipitado de hidróxido de plomo insoluble.
4. Los resultados de la cianuración directa nos demuestra que los concentrados

pirrotíficos no se deben tratar de manera convencional por obtener bajas recuperaciones de oro (por debajo de 61% de recuperación) y los consumos de reactivos son muy elevados.

5. La cianuración de los concentrados sin pre-tratamiento produce iones de azufre y fierro por la descomposición de los sulfuros formando tiocianato CNS , y ferrocianuro $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$.
6. Los consumos de reactivos aplicando la cianuración directa fueron altos y no se pudo lograr mantener la fuerza de cianuro libre. La solución por su tonalidad fue difícil de titular, tenía una coloración rojiza debido al contenido de fierro.
7. Los concentrados de naturaleza pirrotífica (flotación y gravimétrico) requieren de una etapa de oxidación intensiva, hasta que la pirrotita satisfaga su requerimiento de oxígeno y se convierta en un producto manejable en el proceso de cianuración. La pre-aireación es un proceso hidrometalúrgico simple y económico, que se puede introducir en el mismo circuito de cianuración después de la remolienda.
8. Luego de la pruebas piloto con oxidación en medio alcalino podemos afirmar que esta alternativa resulto positiva por la recuperación obtenida, pero reafirma un alto consumo de cianuro (46.01 Kg/t) y cal (41.73 kg/t).
9. La presencia del fierro en la solución producto de la oxidación en medio alcalino, es mínima (26.52 ppm) y en la cianuración también alcanza valores

muy bajos (máx. 95 ppm), lo que nos indica que este ha precipitado como hidróxido férrico.

10. Es crucial lograr una buena difusión de aire, el sistema ideado usando difusores sirvió únicamente para la prueba de oxidación en medio alcalino, ya que tiene la deficiencia que frente a un corte de aire cualquiera sea el motivo, todo el sistema sufre atoros. La utilización de un soplador a baja presión (URAI-65) para la inyección de aire ocasiono problemas debido a que este solo inyecta aire máximo a 6 psi de presión y con la colocación de circulinas hacen que el soplador disminuya su eficiencia para la inyección de aire debido a que tiene que romper la presión que opone la pulpa ocasionando que la difusión de aire se vea afectado.
11. La oxidación en medio alcalina no fue posible alcanzar los 5 ppm de oxígeno disuelto en la pulpa durante la oxidación debido a la influencia de la altura y la temperatura alcanzada no favorece la disolución de oxígeno en la pulpa o agua a partir de aire. A la altitud donde se realizó la prueba (2,600 msnm) y a 35°C de temperatura promedio el proceso se puede saturar con oxígeno solamente hasta 5.1 ppm. Bajo este concepto y considerando la avidez de la Pirrotita por el oxígeno este se considera aceptable.
12. Los productos obtenidos de la oxidación en medio alcalino se envían a laboratorio para el análisis mineralógico los cuales nos indican como se va alterando la estructura del concentrado dando la formación del yeso (CaSO_4). Este mineral puede retardar el proceso de Merrill Crowe ocasionando que las lonas de los filtros precipitadores y clarificadores se saturen prematuramente y

la recuperación mediante carbón activado podría producir una cinética lenta de adsorción.

13. Otro de los problemas de la utilización de cal en la oxidación, aumenta la temperatura ocasionando que disminuya la solubilidad de oxígeno en la pulpa, pero tiene su punto a favor ya que ayuda a la sedimentación de los sólidos.

14. La prueba oxidación en medio alcalino, nos reporta resultados de laboratorio Mineralógico, se puede apreciar que durante las 08 primeras horas de oxidación en medio alcalino ocurren mayormente transformaciones importantes en los sólidos sometidos a oxidación:
 - Comportamiento Pirrotíta-Goethita-Yeso
 - Las primeras 4 a 6 horas del proceso de oxidación se produce un aumento de Pirrotíta y una disminución de Goethita. En las horas posteriores no se aprecia una variación significativa para ambos minerales.
 - Tanto la Pirrotíta como el Yeso aumentan dentro de las primeras 4 a 6 horas, mientras que la goethita muestra un comportamiento inverso.
 - Comportamiento Marcasita
 - La variación en la concentración de marcasita, disminuye durante el proceso de oxidación, produciéndose liberación de azufre que aparentemente reacciona formando yeso, el Hierro de la marcasita más lo aportado por la goethita contribuyen a la formación de más Pirrotíta.
 - Es importante conocer el porcentaje de Marcasita, porque parece ser, que por tratarse de un mineral en "transición", producto de la alteración de la Pirrotíta, puede influir en la formación de más Pirrotíta.

15. La recuperación aplicando la oxidación sin cal supera el 90% y disminuye el consumo de reactivos, sin embargo, la alta acidez de la pulpa genera un deterioro en los tanques agitadores con lo cual se debe considerar que estos deban ser de acero inoxidable o deban ser vulcanizados, esto ocasionara un aumento de costo en la instalación de una planta a futuro.
16. El efecto del filtrado del concentrado de flotación oxidado y luego su lavado favorece a la economía del proceso con oxidación en medio ácido, pero su alta acidez, genera una solución que debe ser filtrada antes de ingresar al proceso de cianuración.
17. La oxidación de los concentrados de flotación sin uso de cal no siempre produce disolución de oro prematuro lo cual favorece al proceso, pero se debe considerar que la solución obtenida en la oxidación antes de desecharla debe pasar primero por unas columnas de carbón para asegurar no perder valores de oro en la solución.
18. Los iones metálicos producidos por la descomposición de los sulfuros pueden permanecer en solución como cationes/iones complejos, o pueden ser precipitados como otras especies tales como los hidróxidos, óxidos y sulfatos. Estas reacciones de precipitación son importantes porque las especies disueltas durante la oxidación pueden ser necesariamente precipitadas en forma de un producto sólido estable adecuada para su eliminación segura. Las reacciones de precipitación que se producen dependen de la mezcla/condiciones de la solución, en particular las concentraciones, temperatura, el pH, la densidad de la pulpa y las especies existentes. La

última de estas a su vez depende de la composición del mineral o concentrado, y el efecto de la oxidación en cada uno de los componentes. En gran medida estas condiciones se pueden controlar para garantizar que las especies más adecuadas se produzcan.

19. La aplicación de la oxidación produce disolución de oro. Uno de los iones formados por la descomposición de los sulfuros es el tiosulfato el cual forma un complejo estable con el oro, y en algunos casos, la disolución del oro durante la oxidación. Esto se confirma en la práctica por la detección de concentraciones bajas de oro en las soluciones del proceso de oxidación en ausencia de cianuro.
20. La utilización del pre-tratamiento de oxidación en medio ácido el cual incluye los procesos de filtración y lavado ocasionan una gran disminución de consumos de reactivos como se puede apreciar en la tabla 4.1:

Tabla 4.1: Resumen de consumo de reactivos

Nº	Reactivo	Kg/tms		
		Directa	Oxidación alcalina	Oxidación ácida
1	Cianuro de sodio	179.85	46.01	20.7
2	Cal viva	54.98	41.73	20.2

21. La influencia de las etapas de filtración y lavado son importantes porque ayudan a eliminar la solución con alto contenido de iones de fierro y azufre ya que estos reaccionan con el cianuro produciendo ferrocianuro y tiocianato. La oxidación con cal también produce la precipitación de estos iones de fierro y

azufre como hidróxido de hierro y sulfatos pero también forma yeso, la suma de todos estos precipitados no ocasionan consumos altos de cianuro, sin embargo ocasionan altos consumos de cal y saturación en los filtros del proceso de Merrill Crowe ocasionando retardo en el proceso.

22. La velocidad de oxidación depende de la transferencia de masa de oxígeno a la superficie del mineral, que es principalmente una función de la concentración de oxígeno disuelto, el grado de mezcla y la temperatura. La baja solubilidad del oxígeno en el agua en condiciones atmosféricas limita las tasas de oxidación que se puede lograr en la práctica. Las concentraciones de oxígeno disuelto se puede aumentar mediante el aumento de la presión parcial de oxígeno en el gas utilizado, por ejemplo, el uso de oxígeno puro en lugar de aire aumenta la tasa de oxidación pero este es mas costoso.
- El grado de agitación también puede ser importante en la optimización del transporte de masa de oxígeno a través de la interfase gas-líquido. Los requisitos aquí no son diferentes a la función de la agitación en los procesos de lixiviación, donde el oxígeno es usado como el oxidante.
 - El aire o el oxígeno se pueden inyectar con sparjed en tanques de agitación y con tiempo de retención suficiente, proporciona y permite la oxidación adecuada y/o disminución de consumo de cianuro de los minerales.
23. El consumo de oxígeno requerido para tratar el concentrado de flotación es de 181.77 m³ /tms, para oxidar la pulpa a un nivel de 6.0 ppm en promedio después de 268 horas.

- La instalación de una Planta de oxígeno sería muy costosa por lo tanto una compresora sería la mejor opción.
- La compresora requerida sería la ZE-4-I-200, que posee las siguientes características:
 - 1,444 CFM igual 2,454.80 m³ aire/hr, de 200 HP
 - Porcentaje de oxígeno en el aire 21.0 %
 - 2,544.80 m³ aire/hr x 0.21 igual 515.51 m³O₂/hr
- El balance de oxígeno de oxígeno con la compresora a baja presión sería como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 4.2: Balance de oxígeno suministrado por la compresora ZE-4-I-200

Balance de requerimiento de oxígeno					
tms	O₂ Requerido (m³)	Tiempo(hr)	m³ O₂/hr	m³ O₂/hr/tms	m³ O₂/tms
30.0	5453.2	11.0	515.5	17.2	181.8

24. En algunas pruebas se utilizó carbón, la principal ventaja de la recuperación por CIP sobre el Merrill Crowe es la eliminación, de la operación, de la unidad de separación de sólidos (Espesamiento) de concentrado lixiviado de los líquidos. Se podría considerar técnicas de adsorción de carbón (CIP ó CIL) para el tratamiento del concentrado final, el 70% de las plantas de procesamiento de oro emplean actualmente estas técnicas.
25. Al utilizar carbón se ocasionan problemas debido a la contaminación por la adsorción, precipitación o entrapamiento físico de otras especies de solución y constituyentes del mineral. El carbón activado es altamente selectivo para la plata y el oro, el orden de preferencia para la absorción de complejos

metálicos es el siguiente:

- $Au(CN)_2^- > Hg(CN)_2 > Ag(CN)_2^- > Cu(CN)_3^{2-} > Zn(CN)_4^{2-} > Ni(CN)_4^{2-} >> Fe(CN)_6^{4-}$
 - Si el hierro no se oxida apropiadamente y se forma el $Fe(CN)_6^{4-}$ a altas concentraciones, éste podría adsorberse en el carbón.
 - Si se oxida el sulfuro de hierro a $Fe(OH)_3$ es un precipitado sólido podría contaminar el carbón (obstruir los poros).
26. En todas las pruebas de suministro de aire se obtiene una presión en los tanques de 12.5 psi, pero si se aumentase la presión rebalsaría la pulpa de los tanques por la turbulencia generada por el aire, por lo tanto la presión de trabajo en tanques 20'Øx20' no debería superar los 12.5 psi.
27. Para el suministro de aire se tiene que utilizar tubería de diámetro menor a 4"Ø, en la salida del pulmón alimentador de planta, en estas pruebas los mejores resultados se obtuvo con tubería de 2"Ø, por lo tanto a medida que se distribuye el aire, se tiene que ir disminuyendo el diámetro de las tuberías con el fin de no perder presión. También la distribución debe ser de manera homogénea para todos los tanques.
28. El proceso de oxidación puede ser mejorado y el tratamiento puede utilizarse de base en el diseño de una planta de beneficio para los concentrados pirrotíticos altamente refractario, donde se concluye, que: luego de la etapa de oxidación ácida, requiere de una etapa de filtración y lavado de los sólidos para eliminar completamente la acidez y lograr un ahorro significativo en el consumo de reactivos en la lixiviación con cianuro. La aplicación de la pre-

aireación a nivel industrial incide en la reducción de costos, aumenta la producción de oro y disminuye la contaminación ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

[1] **Chiacchiarini P.; De la Fuente V.; Donati E.** Pre-tratamiento de un mineral refractario de oro mediante células de Thiobacilli. Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga. 2000

[2] **Costa, M. Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii.** Hydrometallurgy of gold: New perspectives and treatment of refractory sulphide ores. 1997

[3] **Dalley, P.; Allis, B.** Treatment of ores containing reactive iron sulfides. Multi Mix Systems. 2006

[4] **Iglesias, N.; Palencia, P.; Carranza, F.** La biolixiviación como pretratamiento de menas auríferas refractarias en matriz de sulfuros. Dpto. de Ingeniería Química. Universidad de Sevilla. P. García González, Sevilla (España). 1997

[5] **Gekko Systems.** Pruebas de Laboratorio de concentrado de flotación y gravimétrico con cianuración intensiva utilizando el Reactor de Cianuración intensiva (IRL). Australia. 2010

[6] **Gekko Systems**. Reactor de cianuración Intensiva – Introducción, disponible en el catalogo en línea: <<http://www.gekkos.com/>>. 2007

[7] **Marsden, J.; House, I.** The Chemistry of gold extraction-2nd ed.p.cm. Society for Mining, Metallurgy and Exploration. 2006

[8] **Parra, H.; Miranda, R.** Flotación de un Mineral que contiene oro en Pirrotitas. VI Congreso de Minería. Capítulo de Ingeniería de Minas. Colegio de Ingenieros del Perú. Trujillo. Perú. 2006

[9] **Salinas, E.; Rivera, I.; Carrillo, R.; Patiño, F.; Hernández, J.; Hernández, L.** Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la pre-oxidación de minerales sulfurosos con ozono. 2004

[10] **Srithammavut W.** Modeling of gold cyanidation. Lappeenranta University of Technology: Department of Chemical Technology: Master of Science (Technology) Thesis. 2008

[11] **Stevens Institute of Technology**. Porcentaje de Saturación del Oxígeno Disuelto. Center for Innovation in Engineering and Science Education (CIESE), disponible en el catalogo en línea: <<http://www.k12science.org/>>. 2006

[12] **Zhang S. (2004)**. Oxidation of Refractory Gold Concentrates and Simultaneous Dossolution og Gold in aerated Alkaline Solutions. B. Eng. (Appl. Chem.), Tsinghua University, Beijing, China. This thesis is presented for the degree of Doctor of Philosophy of Murdoch University Western Australia. 2004

ANEXOS

ANEXO 1

Porcentaje de Saturación del Oxígeno disuelto

El Porcentaje de Saturación es la cantidad de oxígeno disuelto en la muestra de agua comparada con la cantidad máxima que podría estar presente a la misma temperatura. Por ejemplo, se dice que el agua está saturada en un 100% si contiene la cantidad máxima de oxígeno a esa temperatura. Una muestra de agua que está saturada en un 50% solamente tiene la mitad de la cantidad de oxígeno que potencialmente podría tener a esa temperatura. A veces, el agua se supersatura con oxígeno debido a que el agua se mueve rápidamente. Esto generalmente dura un período corto de tiempo, pero puede ser dañino para los peces y otros organismos acuáticos. Los valores del Porcentaje de Saturación del OD de 80-120% se consideran excelentes y los valores menores al 60% o superiores a 125% se consideran malos.

El Porcentaje de Saturación del Oxígeno disuelto depende de la temperatura del agua y la elevación del lugar donde se toma la muestra de agua. Determine la altitud (elevación) o la presión atmosférica y use la tabla a continuación para determinar el factor de corrección. Multiplique el nivel de Oxígeno Disuelto (en ppm) por el factor de corrección.

Tabla: Factor de corrección

Presión Atmosférica (mmHg)	Altitud Equivalente (pies)	Factor de Corrección
775	540	1.02
760	0	1.00
745	542	0.98
730	1094	0.96
714	1688	0.94
699	2274	0.92
684	2864	0.90
669	3466	0.88
654	4082	0.86
638	4756	0.84
623	5403	0.82
608	6065	0.80
593	6744	0.78
578	7440	0.76
562	8204	0.74
547	8939	0.72
532	9694	0.70
517	10,472	0.68

*Tomado del Manual de Campo para el Monitoreo de la Calidad del Agua

Use la tabla a continuación para convertir el nivel corregido de Oxígeno Disuelto en ppm a Porcentaje de Saturación del Oxígeno Disuelto (ppm es equivalente a mg/l). Para hacer esto, siga estas instrucciones:

1. Marque el valor corregido del Oxígeno Disuelto en la línea inferior del *Nivel de la Tabla de Saturación de Oxígeno* a continuación.
2. Luego, marque la temperatura del agua en la línea superior de la tabla.

3. Dibuje una línea recta desde la marca del oxígeno en mg/L hasta la marca de la temperatura del agua.
 4. El valor convertido del Porcentaje de Saturación es aquel en que la línea recta que se ha dibujado pasa a través de la línea de % de saturación.
- NOTA:** Los valores del Porcentaje de Saturación de 80 - 120% se consideran excelentes y los valores menores al 60% o superiores al 125% se consideran malos.

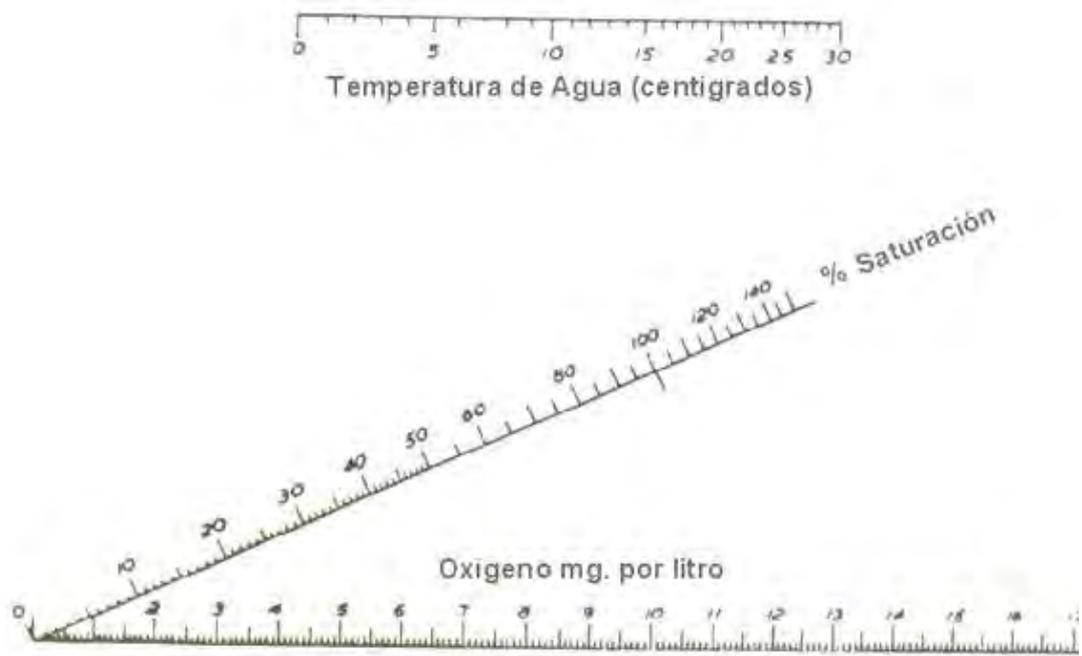


Figura Nivel de Saturación de oxígeno

ANEXO 2

Operación del reactor de lixiviación en línea (ILR) – Modelo batch

El concentrado proveniente del sistema de recuperación primaria reporta al cono de alimentación del reactor para su desaguado donde el rebalse retorna hacia el proceso de planta. Los sólidos son almacenados en el cono de alimentación hasta el comienzo del ciclo.

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 “rompedores” y aireación maximizan la performance de lixiviación. El tiempo de residencia es pre-establecido en el laboratorio y controlado por el volumen de diseño del reactor.

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.

Al completar el ciclo de lixiviación la solución es clarificada y luego bombeada al circuito de electro deposición. Los sólidos remanentes (colas) son vaciados mediante el giro reverso del tambor y bombeados hacia el circuito (normalmente molienda).

Gekko Systems Batch ILR Flowsheet

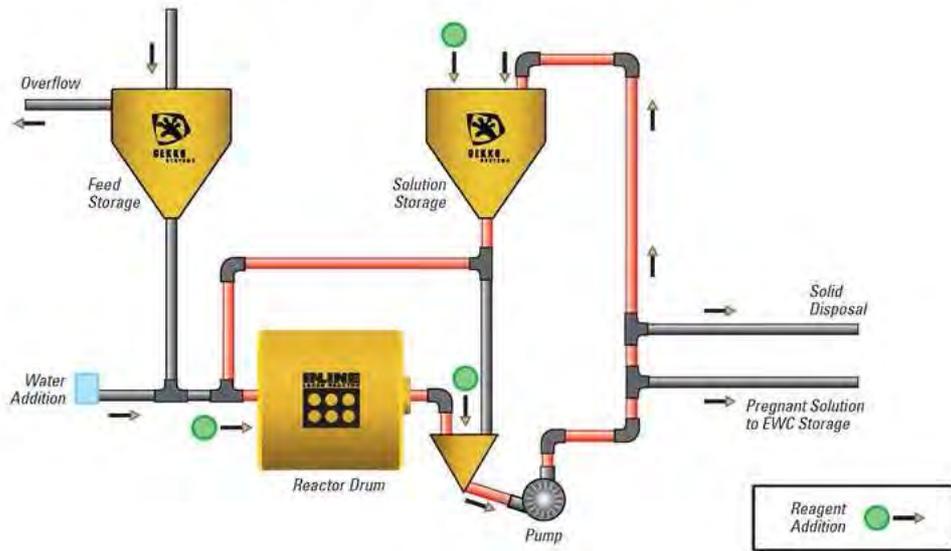


Figura: Flow sheet reactor batch de Gekko Systems

ANEXO 3

Estudio microscópico de concentrados pirrotíticos

Tabla: Abreviatura de minerales presentes

Nº	Abreviatura	Nombre	Composición Química
1	apy	arsenopirita	FeAsS
2	Au	oro nativo	Au
3	cp	calcopirita	CuFeS ₂
4	ef	esfalerita	(Zn, Fe)S
5	en	enargita	Cu ₃ AsS ₄
6	GGs	"gangas"	(variada)
7	Ox.Fe	limonitas, hematita	FeOOH, Fe ₂ O ₃
8	mc	marcasita	FeS ₂
9	py	pirita	FeS ₂
10	po	pirrotita	Fe _(1-x) S

Concentrado de Flotación

Tabla Cuantitativa de especies mineralógicas malla +200

Minerales Libres	GGs	ef	cp	py	apy	po	mc	Au	en
Gangas	38.88								
Esfalerita		0							
Calcopirita			0						
Pirita				5.43					
Arsenopirita					1.12				
Pirrotíta						26.5			
Marcasita							0.34		
Oro Nativo								0.26	
Enargita									0.04
Minerales asociados									
GGs-po	6.78					7.49			
py-ef		0.02		0.38					
GGs-py-po	1.27			0.04		0.38			
GGs-cp	0.25		0.11						
GGs-py	1.87			7.07					
GGs-Au	0.10							0.13	
po-apy					0.14	0.25			
GGs-apy	0.04				0.38				
GGs-po-cp	0.04		0.03			0.22			
GGs-ef	0.08	0.1							
GGs-po-apy	0.16				0.05	0.04			
Total	49.47	0.12	0.14	12.92	1.69	34.88	0.34	0.39	0.04

Tabla Cuantitativa de especies mineralógicas malla -200

Minerales Libres	GGs	ef	cp	py	apy	po	mc	Au	en	Ox.Fe
Gangas	31.27									
Esfalerita		0								
Calcopirita			0							
Pirita				2.26						
Arsenopirita					0					
Pirrotita						26.5				
Marcasita							0.12			
Oro Nativo								0.72		
Enargita									0.05	
Ox. Fe										0.00
Minerales asociados										
GGs-po	12.56					9.17				
GGs-py-po	0.27			0.37		1.86				
GGs-cp	0.31		0.25							
GGs-py	1.32			9.32						
GGs-apy	0.07				0.15					
GGs-po-cp	0.05		0.03			0.56				
GGs-ef	0.07	0.17								
GGs-po-apy	0.26				0.05	0.44				
GGs-po-py-Au	0.13			0.12		0.27		0.46		
Au-hm								0.66		0.15
Total	46.31	0.17	0.28	12.07	0.2	38.8	0.12	1.84	0.05	0.15

Concentrado de Gravimétrico

Tabla Cuantitativa de especies mineralógicas malla +200

Minerales Libres	GGs	ef	cp	py	apy	po	Au	Ox.Fe
Gangas	63.88							
Esfalerita		0.15						
Calcopirita			0.18					
Pirita				0.89				
Arsenopirita					0.96			
Pirrotita						23.72		
Oro Nativo							0.68	
Óxidos de Hierro								0.26
Minerales asociados								
GGs-po	1.34					4.84		
py-ef		0.15		0.02				
GGs-py-po	0.12			0.25		0.32		
GGs-py	0.16			0.15				
GGs-apy	0.03				0.16			
GGs-po-cp	0.05		0.06			0.03		
GGs-ef	0.10	0.15						
GGs-po-apy	0.03				0.16	0.40		
GGs-Ox.Fe	0.15							0.09
GGs-Au-po	0.19					0.04	0.10	
GGs-Au-Ox.Fe	0.04						0.12	0.02
Total	66.09	0.45	0.24	1.31	1.28	29.35	0.9	0.37

Tabla Cuantitativa de especies mineralógicas malla -200

Minerales Libres	GGs	ef	cp	py	apy	po	Au	Ox.Fe
Gangas	16.39							
Esfalerita		0.85						
Calcopirita			0.18					
Pirita				0.21				
Arsenopirita					6.72			
Pirrotíta						41.68		
Oro Nativo							2.78	
Óxidos de Fierro								0.30
Minerales asociados								
GGs-po	5.73					17.36		
GGs-py-po	0.08		0.02			0.22		
GGs-py	0.08			0.18				
GGs-apy	0.78				4.78			
GGs-ef	0.12	0.51						
GGs-Ox.Fe	0.17							0.12
GGs-Au-Ox.Fe	0.13						0.12	0.05
GGs-Au	0.06						0.37	
Total	23.54	1.36	0.2	0.39	11.5	59.26	3.27	0.47