

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.**

**"Caracterización y Ensayos de Cianuración Intensiva de  
Muestras Minerales con Contenido de Oro del Distrito  
Minero Ponce Enríquez – Ecuador"**

**TESIS DE GRADO**

**Previo a la obtención del Título de:**

**INGENIERO DE MINAS.**

**Presentada por:**

**JUAN CARLOS GUERRERO BARRETO**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**2006**

## **AGRADECIMIENTO**

A mi Dios y mi Virgen porque sin su apoyo no hubiese sido capaz de concluir mi Tesis.

A mi Director de Tesis, el Dr. Fernando Morante Carballo un agradecimiento muy especial porque gracias a sus gestiones se logró conseguir la pasantía en Brasil en el Centro de Tecnología Mineral/CETEM; además de sus sabias contribuciones que orientaron el desarrollo de esta investigación y mi formación como investigador.

Al CETEM y en su nombre al Dr. Adao Benvindo da Luz, director de este prestigioso centro de investigación por la total apertura brindada para el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Moisés Tacle, Rector de la ESPOL, al Ing. Ricardo Gallegos, Decano de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, a mis profesores y a la Dra. Elizabeth Peña coordinadora de la carrera de ingeniería de minas.

Al Centro de Investigación Científica y Tecnológica/CYCIT, por la logística y apoyo económico brindado al proyecto, que dignamente el Dr. Paúl Carrión preside.

Agradezco también al Ing. Vicente Encalada gerente general de COMIMACH S.A. y al Ing. Roberto Loaiza de la Empresa ORENAS S.A. por su colaboración y ayuda.

A los Señores, Luis Gonzaga Santos Sobral, Ary Caldas Pinheiro, Verónica Ramos por su colaboración como orientadores.

Al Señor Ronaldo Luiz Correa Dos Santos jefe del departamento y las Sra. Secretaria Fátima.

A las personas Coordenação de Análises Minerais - COAM, Señores Nelma, Arnaldo, Reinner, Vanesa, Gaspar, Marcos, por su cooperación.

A mis grandes amigos Marcia Bifano, Maria Díaz, Mónica Lima, Renata Lima, André Ventura, Jorge da Cruz y Javier Montalván, por su apoyo incondicional y su gran ayuda en el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos y compañeros, Acacia, Bianca, Danielle, Débora, Gabrielle, Griselda, Grace, Jackeline, Liliana, Priscila, Renata Raimundo, Sabrina, Tatiani, Byron, Diego, Patricio, Pedro y Ronald.

Al Señor Alberto Recalde, auxiliar de servicios del área de minas por su ayuda en el tratamiento de las muestras.

Finalmente a mi familia que con sus ejemplos y consejos me han guiado en mi formación moral y profesional, además de la fe y confianza que me dieron, espero no haberlos defraudado.

## **DEDICATORIA**

A mi Dios,  
La Virgen María y  
Mi Familia.

## **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN.**

---

**MSC. EUGENIO NUÑEZ DEL ARCO.**  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

**DR. FERNANDO MORANTE C.**  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

**DRA. ELIZABETH PEÑA C.**  
**VOCAL**

---

**ING. JORGE VELASCO V.**  
**VOCAL**

## **DECLARACIÓN EXPRESA.**

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

Juan Carlos Guerrero Barreto.

## RESUMEN

Actualmente en el Ecuador existen yacimientos y grandes cantidades de residuos minerales con características refractarias y contenidos importantes de oro que no se han podido recuperar. Lamentablemente en el Ecuador, la minería del oro, sufre por la falta de laboratorios que puedan ayudar a los investigadores a desarrollar una tecnología apropiada para éste fin.

En éste trabajo, son presentados los resultados obtenidos en la caracterización y ensayos de cianuración intensiva de cuatro muestras minerales del distrito minero de Ponce Enríquez. Tres de las muestras: el mineral de cabeza (JG-01), el concentrado del mineral de cabeza (JG-03) y la cola de cianuración (JG-04) fueron recolectadas en la concesión minera Santa Martha mientras que, la ultima muestra de cola de cianuración (CH-01) proviene de la concesión minera Bella Rica.

Las muestras fueron caracterizadas por difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica y ensayos al fuego. Los análisis fueron efectuados en los

laboratorios de la Coordinación de Análisis Mineral (COAM) del Centro de Tecnología Mineral (CETEM) de Brasil.

En el laboratorio, se realizaron dos etapas de ensayos de cianuración intensiva para las cuatro muestras donde se variaron los parámetros tales como: concentración de cianuro, aireación, pH y granulometría.

Se determinó que las leyes de las muestras JG-01, JG-03, JG-04, CH-01 son 9.4, 23.7, 56.7 y 14.8 g/t respectivamente, con presencia minerales de pirita, calcopirita, pirrotina, calcita, yeso y cuarzo.

Para los ensayos de cianuración intensiva en las muestras CH-01, JG-01, JG-03 y JG-04, se consiguió una disolución de oro de: 30.3%, 47.2%, 71.9%, 28.4% respectivamente en la Etapa I; mientras que para la etapa II estas fueron 22.3%, 52.5%, 54.6% y 18.9%, respectivamente. Si los tenores y el precio de oro (559.8 USD/onza troy) se mantienen en ese rango, este método resulta conveniente para su aplicación.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI

## ***CAPÍTULO I***

### **INTRODUCCIÓN**

I.1	Antecedentes	1
I.2	Ubicación del Área de Estudio	7
I.3	Muestreo	9

## ***CAPÍTULO II***

### **MARCO TEORICO**

II.1	Caracterización	10
	II.1.1 Composición Mineral	12
	II.1.2 Características de Textura	13
II.2	Cianuración	14
	II.2.1 Introducción	14

II.2.2	Química de las Soluciones de Cianuro	15
II.2.3	Disolución de Oro	19
II.2.4	Efectos de las Variables del Proceso	22
II.2.5	Cianuración Intensiva	23
II.3	Degradación de Cianuro	24
II.3.1	Introducción	24
II.3.2	Degradación de Cianuro por el Peróxido de Hidrógeno – Hipoclorito de Sodio.	25

### ***CAPÍTULO III***

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

III.1	Metodología para la Caracterización	28
III.2	Cianuración Intensiva	29
III.2.1	Procedimiento	30
III.2.2	Equipos Utilizados	36
III.2.3	Parámetros	39
III.3	Degradación del Cianuro	40

### ***CAPÍTULO IV***

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

IV.1	Caracterización	43
IV.1.1	Muestra de Mineral de Cabeza (JG-01)	43

IV.1.2	Muestra de Cola de Cianuración de Bella Rica (CH-01)	45
IV.1.3	Muestra de Cola de Cianuración de Santa Martha (JG-04)	47
IV.1.4	Muestra de Concentrado de Flotación (JG-03)	49
IV.2	Recuperación de Oro de los materiales lixiviados	52
IV.3	Efectos de la Concentración de Cianuro, Oxígeno y nivel de pH.	54
IV.4.	Efecto del Tiempo de Residencia	56
IV.5.	Efecto de la Granulometría de la muestras	58
IV.6.	Costos del Proyecto	59
IV.7.	Análisis Comparativos con las tecnologías Actuales	63

## ***CAPÍTULO V***

### **CONCLUSIONES**

V.1	Conclusiones y Recomendaciones	65
V.2	Nuevas líneas de investigación	69

<b>ANEXOS</b>	71
---------------	----

<b>REFERENCIAS</b>	89
--------------------	----

## ABREVIATURAS

AAS	Espectrometría Adsorción Atómica
AES	Auger electron spectroscopy
Ag	Plata
AgNO <sub>3</sub>	Nitrato de Plata
Au	Oro
Au	Oro
Au(CN)	Cianuro de Oro
Ca	Calcio
CaO	Oxido de cal
CETEM	Centro de Tecnología Mineral
CN <sup>-</sup>	Cianuro
CNNa	Cianuro de Sodio
Co	Cobalto
COAM	Coordinación de Análisis Mineral del CETEM
Cu	Cobre
CYCIT	Centro de Investigación Científica y Tecnológica
DRX	Difracción de Rayos X
EMPA	Electron Microprobe analysis
Fe	Hierro
Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup>	Cianuro de Hierro
FRX	Fluorescencia de rayos X
G	Gramos
g/100 cc	Gramos por cada 100 centímetros cúbicos
g/l	Gramos por litro
g/t	Gramos por tonelada
H <sub>2</sub> O	Agua
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de Hidrógeno
HCN	Ácido Nítrico
ICP	Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma
K	Potasio
KCN	Cianuro de Potasio
Kg/t	Kilogramos por tonelada
KOH	Hidróxido de Potasio
Kv	Kilovoltios

M	Molaridad
MCT	Ministério de Ciência y tecnologia de Brasil
Mg/cm <sup>2</sup>	Miligramos por centímetro cuadrado
ml	Mililitros
Mm	Milímetros
Na	Sodio
NaCl	Cloruro de Sodio
NaI	Ioduro de sodio
NaOCl	Hipoclorito de Sodio
NaOH	Hidróxido de Sodio
NH <sub>4</sub>	Amonia
Ni	Níquel
O	Oxígeno
°C	Grados centígrados
OH <sup>-</sup>	Hidróxidos
Rpm	Revoluciones por minuto
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido
SIMS	Espectrometría de Masas de Ión Secundario
T	Tonelada
t/año	Toneladas por año
USD	Dólares Americanos
USD/Kg	Dólares americanos por Kilogramo
XPS-ESCA	Massbauer spectroscopy
Zn	Zinc
>	Mayor

## ÍNDICE DE FIGURAS

#	Titulo	Pág.
1.1.	Variación de los precios de oro en el tiempo	3
1.2.	Metodología usada en la investigación	5
1.3.	Ubicación de la zona de estudio	8
2.1.	Diagrama de distribución de especies para el sistema CN-H <sub>2</sub> O a 25 <sup>0</sup> C.	17
2.2.	Diagrama de Eh-pH para el sistema Au-H <sub>2</sub> O-CN- a 25 <sup>0</sup> C. Concentración de todas las especies solubles de oro= 10 <sup>-4</sup> M	20
3.1.	Metodología para la caracterización.	29
3.2.	Eliminación de Cianuro en las muestras tomadas en los ensayos de cianuración intensiva.	36
3.3.	Representación grafica del equipamiento.	37
3.4.	Fotos de los equipos utilizados en cada una de las etapas para los ensayos de cianuración intensiva.	38
3.5.	Reacción de la degradación de cianuro, después de añadido los reactivos, con agitación constante.	41
4.1.	Difractograma de la muestra JG-01.	44
4.2.	Difractograma de la muestra CH-01	46
4.3.	Difractograma de la muestra JG-04	48
4.4.	Difractograma de la muestra JG-03	50
4.5.	Recuperación de oro para cada una de las muestras minerales en la etapa I.	53
4.6.	Recuperación de oro para cada una de las muestras minerales en la etapa II	53
4.7.	Consumo de Cianuro en las muestras de la etapa I, con pH 11 sin aireación, y tiempo de residencia de 6 horas	55
4.8.	Consumo de Cianuro en las muestras de la etapa I, con pH 10.5, con aireación, y tiempo de residencia de 24 horas	55
4.9.	Comportamiento de la disolución de oro en los ensayos de la primera etapa	57
4.10.	Comportamiento de la disolución de oro en los ensayos de la segunda etapa	57

## ÍNDICE DE TABLAS

#	Titulo	Pág.
1.1.	Datos de la hoja topográfica Ponce Enríquez	8
1.2.	Detalle de muestras seleccionadas	9
2.1.	Propiedades de los compuestos simples de cianuro	16
2.2.	Constantes de estabilidad para complejos metálicos de cianuro.	18
3.1.	Parámetros de cada una de las dos etapas de Cianuración Intensiva	40
4.1.	Principales especies minerales y su abundancia en las muestras originales	51
4.2.	Tenores de oro y tamaño de grano de las muestras originales	52
4.3.	Comparación de los parámetros de cianuración desarrollados por COMIMACH S.A. vs cianuración intensiva	60
4.4.	Datos para el calculo de costo de operación	61
4.5.	Costos de operación y oro disuelto en los ensayos	62

# CAPÍTULO I

## I. INTRODUCCIÓN

### I.1. Antecedentes

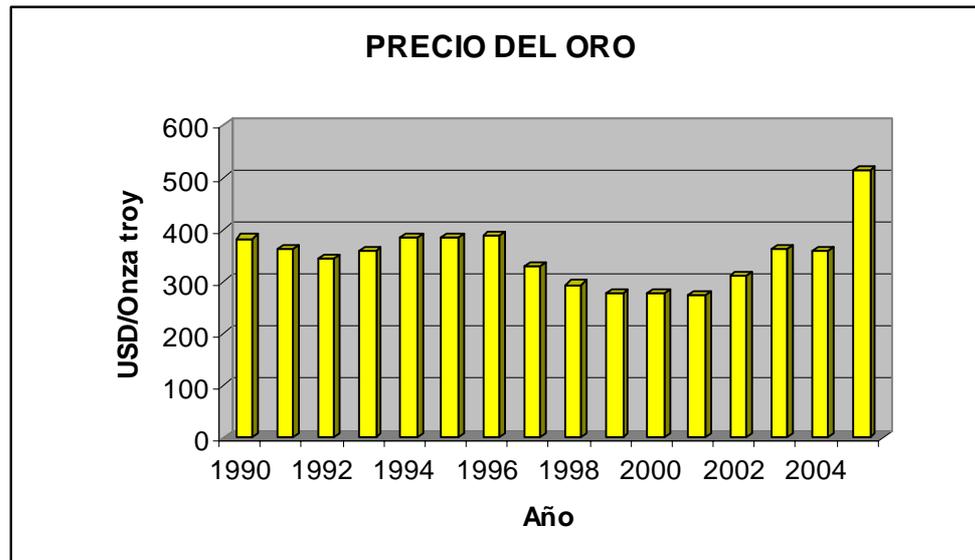
La minería en el Ecuador, en especial la del oro, no cuenta con una infraestructura de laboratorios, que permita la búsqueda del conocimiento dirigido a descubrir mecanismos que puedan enrumbar la definición de nuevos procesos y tecnologías adecuadas en la extracción de oro.

En el Ecuador, existen grandes cantidades de residuos minerales con características refractarias y contenidos importantes de oro que han sido acumuladas por varias plantas industriales en diversas zonas del país (1). Pachaca y Ávila (2) no descartan que el oro esté asociado a la pirita, sulfuros de cobre y arsénico. Rodríguez (3) y Holguín (4) han realizado estudios de flotación en el distrito Minero de Ponce Enríquez, pero

lamentablemente no han encontrado un método de recuperación mineral, que no afecte en gran medida al medio ambiente, con altos porcentajes de recuperación. Las empresas mineras del sector, se encuentran interesadas en realizar esta clase de análisis para caracterizar los nuevos yacimientos encontrados y las colas de las piscinas de relaves, debido a los grandes volúmenes y de esta manera encontrar un posterior tratamiento para liberar el oro que no ha podido ser recuperado (4). Del análisis microscópico solicitado por la compañía ORENAS a la empresa GEOEXINSA, se muestra un gran porcentaje de pirita en la muestra (5).

Por otra parte, la principal fuente de ingresos del Cantón Ponce Enríquez es la minería y su distrito cubre 1500 Ha. La Concesión minera fue otorgada por el Estado ecuatoriano a la Cooperativa Bella Rica en Abril de 1991. Hay 147 miembros que encabezan una Sociedad o pequeña compañía minera con su propio equipo y personal. En total, unas 5000 personas están directamente empleadas y muchas más dependen de las operaciones mineras. Los 147 miembros contribuyen con fondos que son usados en la administración, servicios y bienestar general de la Cooperativa. La Cooperativa a su vez construye y mantiene carreteras dentro del sector, escuelas, centro de salud y proporciona la recolección de basura (6).

El precio del oro actualmente está en aumento y ya ha pasado la barrera de los 500 USD/onza troy. La figura 1.1 muestra la variación del precio de oro con respecto al tiempo y sus tendencias.



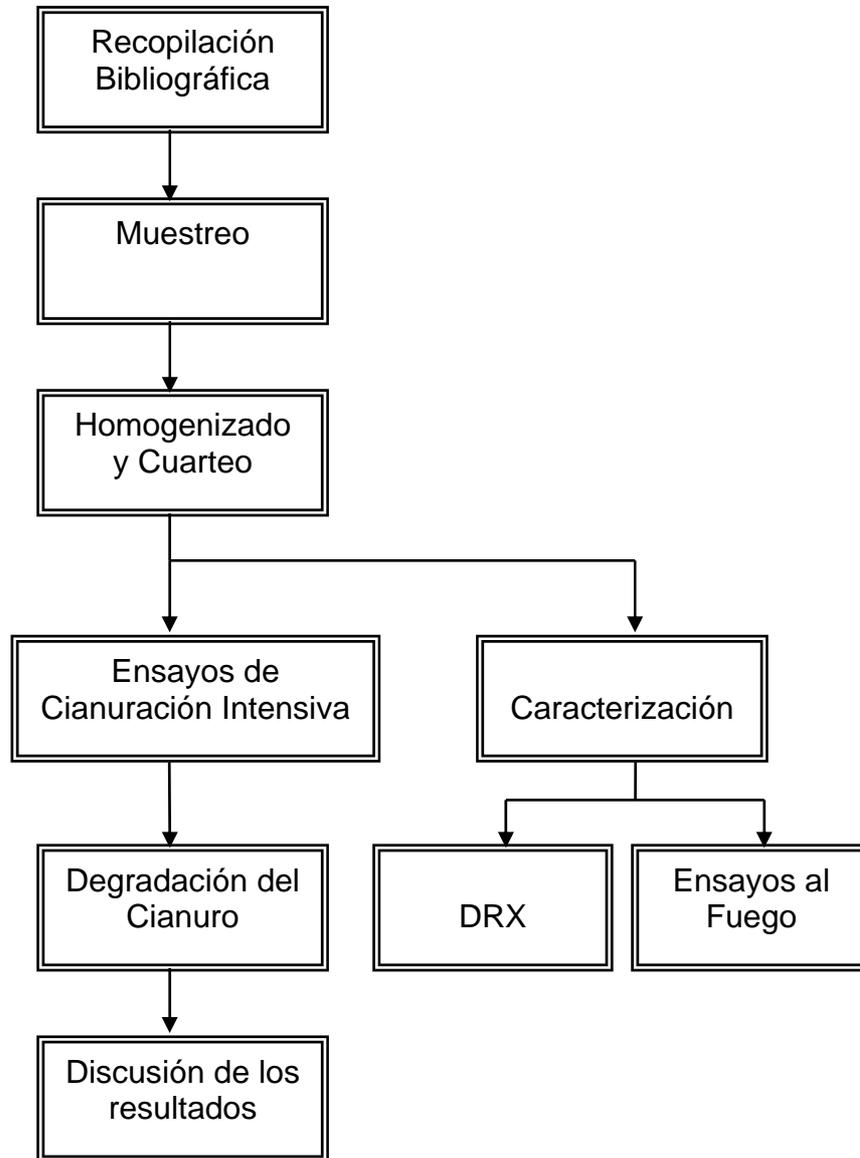
**Fig. 1.1.-** Variación de los precios de oro en el tiempo.

**Fuente:** Silver Institute / World gold Council.

El presente trabajo se inscribe en investigaciones, patrocinadas por el Centro de Tecnología Mineral de Brasil (CETEM) y Centro de Investigación Científica y Tecnológica (CYCIT). La investigación se basa en los siguientes objetivos principales:

- a. Caracterizar los yacimientos y las colas de las piscinas de relaves de la zona de estudio.
- b. Aportar con nuevos conocimientos para el desarrollo científico y tecnológico en el área de la minería metálica.
- c. Contribuir con este estudio con un nuevo método de recuperación de oro refractario, el cual no se lo está aplicando en nuestro medio.

A continuación se presenta un diagrama de flujo de las actividades que se han desarrollado en esta investigación:



**Fig. 1.2.-** Metodología usada en la investigación.

La cianuración intensiva es aplicada principalmente para la disolución de oro de grano grueso (> 14 mesh), método alternativo para la amalgamación, y en menas con contenido de minerales de sulfuro como es el caso de la pirita (7).

Actualmente las empresas mineras de oro del mundo, están utilizando la lixiviación intensiva por sus ventajas sobre las de la amalgamación, debido a que produce menos contaminación y una mayor recuperación de oro. En procesos de pre-tratamiento, como es el caso del ataque de bacterias, el tiempo de lixiviación es muy prolongado (varios meses), por tanto, para poder recuperar rápidamente parte de la inversión en las plantas que utilizan este proceso, se ven obligadas a utilizar la cianuración intensiva como una primera etapa y cianuración convencional en la etapa después del pre-tratamiento, pues hasta el momento, ningún método es más eficiente y económico como lo es la disolución de oro con cianuro. La cianuración intensiva es también eficiente en presencia de minerales sulfurosos, pues produce una atmósfera fuertemente oxidante capaz de romper la armazón de estos minerales.

Es también cierto que esta tecnología trabaja en la mayor parte de las empresas con concentrados minerales, pero dentro de la visión de este proyecto es considerar otras posibilidades.

La eliminación de soluciones con contenidos de Cianuro es un problema y actualmente en lo que se refiere al sector mineral, los procesos de degradación de cianuro más utilizados son: Oxidaciones con peróxido de hidrógeno e hipoclorito de sodio (o calcio), utilizados separadamente.

Los resultados del trabajo de degradación de cianuro a través del Peróxido de hidrógeno/hipoclorito confirmaron las expectativas de soluciones adecuadas para la evacuación de efluentes en menor tiempo, aliando ventajas de los dos procesos industriales utilizados (8).

## **I.2. Ubicación del Área del Estudio**

El área de estudio se encuentra ubicada en la Provincia del Azuay-Ecuador en el distrito minero de Bella Rica, y el acceso es por vía terrestre por la carretera Guayaquil-Machala.

Cartográficamente la zona de estudio se ubica en la hoja del IGM (Instituto Geográfico Militar) denominada Ponce Enríquez. Los datos de la misma se detallan a continuación:

Hoja:	Ponce Enríquez
Código:	CT-NVI-A2, 3684-I
Serie:	J721
Escala:	1: 50.000
Dato Horizontal:	Provisional de 1956 para América del Sur (La Canoa- Venezuela)
Dato Vertical:	Nivel medio del mar estación mareográfica de La Libertad, Provincia del Guayas, 1959
Zona:	17

**Tabla 1.1.-** Datos de la hoja topográfica Ponce Enríquez.

**Fuente:** Instituto Geográfico Militar del Ecuador.



**Fig. 1.3.-** Ubicación de la zona de estudio

### I.3. Muestreo

Se realizaron tres salidas de campo, para recolectar 7 muestras representativas de dos yacimientos: De la planta de la tratamiento de COMIMACH S.A. (concesión Bella Rica) y de la planta de tratamiento de ORENAS S.A. (concesión Santa Martha), de las cuales solo cuatro fueron seleccionadas para su posterior análisis en los laboratorios del CETEM (tabla 1.2).

<i>Muestra #</i>	<i>Código</i>	<i>Peso (Kg.)</i>	<i>Lugar</i>	<i>Descripción</i>
1	CH-01	2,0	Bella Rica	Cola de Cianuración 1
2	JG-01	1,4	Santa Martha	Cabeza
3	JG-03	1,0	Santa Martha	Producto de Flotación
4	JG-04	1,2	Santa Martha	Cola de Cianuración 2

**Tabla 1.2.-** Detalle de muestras seleccionadas

La empresa ORENAS S. A. proporcionó las muestras JG-01, JG-03, JG-04. El producto de flotación lo obtuvo la empresa concentrando el mineral de cabeza (JG-01). La muestra CH-01 fue tomada de las colas de cianuración en la empresa COMIMACH S.A.

# CAPÍTULO II

## II. MARCO TEÓRICO

### II.1. Caracterización

Las clasificaciones de los minerales dentro de un grupo de un metal, suelen hacerse por su abundancia en la naturaleza, por su composición mineralógica o por su proceso de tratamiento. Una clasificación específica puede ser: Oro Libre (Placeres), Oro Combinado (teluros), y Oro Asociado con sulfuros de hierro (Pirita, Marcasita, Pirrotina), sulfuros de arsénico y antimonio (arsenopirita), sulfuros de cobre (calcopirita), minerales carbonáceos, silicatos, carbonatos, minerales micáceos, etc. (9).

La pirita es el mineral más común que puede llevar al oro asociado. Dependiendo del desarrollo geológico del yacimiento, dicho oro puede ser liberado por molienda más o menos fina, o estar diseminado como

inclusiones a veces de tamaños de micras, haciendo al mineral refractario a los procesos normales. De gran importancia es el contenido de azufre, aumentando las dificultades con su incremento y pudiendo estar asociado el oro a la pirita y/o ganga. Además, normalmente las especies son mixtas: de pirita y arsenopirita.

El oro más que una solución sólida, se encuentra asociado a los granos de sulfuros de forma finísima, a veces de menos de una micra, imposible de detectar por los métodos normales de microscopía. Normalmente la calcopirita se encuentra asociada con mayor o menor contenido de pirita, y el oro, muy fino, puede estar bordeando o incluido en ambas especies. Por otra parte la magnetita y otros óxidos de hierro secundarios, pueden llevar asociaciones de oro secundario. Es normal que el oro se encuentre finamente diseminado y recubierto de finas partículas de arcillas y de lamas naturales (9).

Para entender los requerimientos de los procesos de minerales de oro, es importante y necesario describir las propiedades mineralógicas, usualmente en términos de cantidad (7).

Los Parámetros a ser determinados son:

1. Ley del mineral
2. Composición Mineral (elemental y mineralógica)
3. Concentraciones de cualquier otro mineral con valor económico
4. Concentraciones de minerales que afecten al proceso
5. Tamaño de grano y distribución del Oro
6. Tipos de minerales de Oro
7. Características de liberación de todos los minerales

Los parámetros más importantes a ser determinados para entender los requerimientos de los procesos son:

### **II.1.1. Composición Mineral**

Para el análisis de contenido de oro se usa uno o dos de los siguientes métodos:

- 1) Ensayos al fuego (Fire Assay)
- 2) Digestión Ácida y Espectrometría de Adsorción Atómica (AAS), Espectrometría de emisión atómica con plasma (ICP).

- 3) Lixiviación con cianuro y AAS/Ensayos al fuego
- 4) Métodos Físicos (concentración en batea y amalgamación)

Para Otros metales y minerales de Ganga:

Los análisis de minerales de ganga son generalmente mucho más fáciles debido a que sus concentraciones son mayores (elevadas) y pueden ser realizados por:

- 1) Lixiviación y AAS
- 2) Lixiviación y ICP
- 3) Fluorescencia de rayos X (FRX)
- 4) Difracción de rayos X (DRX)

### **II.1.2. Características de Textura**

Los métodos para la determinación de información concerniente a la asociación común entre elementos y, en muchos casos, a minerales específicos, son:

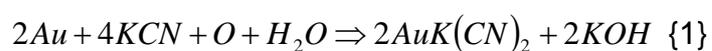
- 1) Microscopia Óptica
- 2) Lixiviación Diagnostica

- 3) Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)
- 4) Electron Microprobe analysis (EMPA)
- 5) Massbauer spectroscopy (XPS-ESCA)
- 6) Auger electron spectroscopy (AES)
- 7) Espectrometría de Masas de Ión Secundario(SIMS)
- 8) Proton Micropobe.

## II.2. Cianuración

### II.2.1. Introducción

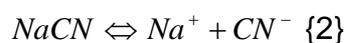
La solubilidad del oro en soluciones de cianuro (7) fue reconocida en 1783 por Scheele (Suecia) y fue estudiada en los años 1840 y 1850 por Elkington y Bragation (Rusia), Elsner (Alemania), y Faraday (Inglaterra). La disolución de oro en soluciones aireadas de cianuro y la regla del oxígeno en su mecanismo fue investigada por Elsner en 1846, y la reacción fue reportada por Shoemaker, (11), como se muestra continuación:



Los tres primeros usos comerciales del proceso de cianuración ocurrieron en la Mina de Crown, en Nueva Zelanda, en 1889 y en Robinson Deep, en Witwatersrand, África del Sur, en 1890. La primera Unidad industrial en América (11), La Consolidated Mercur, entro en operación en 1981, en Utah, Estados Unidos (12). El impacto del nuevo proceso en la producción de oro quedó demostrado por la elevación de la producción de oro de 4,2 t/año en el periodo 1851-1900 a 14,6 t/año en el periodo 1901-1950 (13).

### **II.2.2. Química de las Soluciones de Cianuro**

Las sales de cianuro, tales como, las de cianuro de potasio y sodio, se disuelven y se ionizan en agua para formar su respectivo catión de metal e iones de cianuro libre (reacción 2):



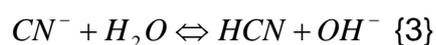
La solubilidad y el contenido relativo de cianuro de las diferentes sales de cianuro son dadas en la tabla 2.1. La selección del tipo de cianuro depende del método de aplicación, el costo y la disponibilidad.

<b>Compuesto</b>	<b>Cianuro Disponible (%)</b>	<b>Solubilidad en agua a 25% (g/100cc)</b>
NaCN	53.1	48
KCN	40.0	50
Ca(CN) <sub>2</sub>	56.5	Soluble

**Tabla 2.1.-** Propiedades de los compuestos simples de cianuro.

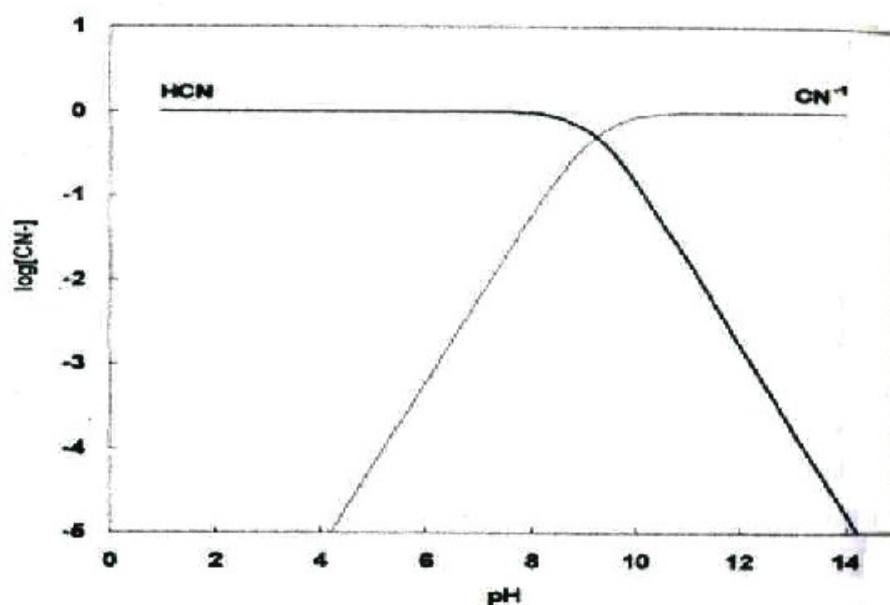
**Fuente:** Weast R. (13).

La hidrólisis de los iones de cianuro en agua a la forma molecular de ácido cianhídrico (HCN) y de iones hidróxidos (OH<sup>-</sup>), se muestra en la reacción 3:



La posterior disociación del ácido en iones H<sup>+</sup> y CN<sup>-</sup> tiene implicaciones importantes en la práctica de la cianuración. El ácido cianhídrico presenta una elevada presión de vapor, lo que favorece a la formación de gas HCN. Por razones económicas (perdidas de reactivos) y ambientales (toxicidad del gas cianhídrico), la cianuración

deberá ser conducida en condiciones en que la formación de ese gas sea minimizada (10). El diagrama de distribución de especies, para el sistema HCN/CN<sup>-</sup> mostrado en la figura 2.1, ilustra que un pH de 9,2 la especie de HCN predomina, en cuanto a los pH superior, a 9,2, el cianuro libre prevalece.



**Figura 2.1-** Diagrama de distribución de especies para el sistema CN<sup>-</sup>-H<sub>2</sub>O a 25<sup>0</sup>C.

**Fuente:** Smith R.y Marcell, A. (14)

El cianuro libre forma complejos con muchas especies de metales, principalmente del grupo de metales de transición, que varían ampliamente en estabilidad y solubilidad (7). (Ver tabla 2.2)

<i>Ion</i>	<i>Complejo</i>	<i>Log β<sub>1</sub></i>
Zn <sup>2+</sup>	Zn(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	19.6
Ag <sup>+</sup>	Ag(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	20.5
Cu <sup>+</sup>	Cu(CN) <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	21.6
Ni <sup>2+</sup>	Ni(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	30.2
Fe <sup>2+</sup>	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup>	35.4
Au <sup>+</sup>	Au(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	39.3
Fe <sup>3+</sup>	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup>	43.6
Co <sup>3+</sup>	Co(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup>	64.0

**β** representa la constante de equilibrio a la siguiente reacción de acomplejamiento del metal:  $M^{n+} + mCN^{-} = M(CN)_m$ . <sup>n-m</sup>

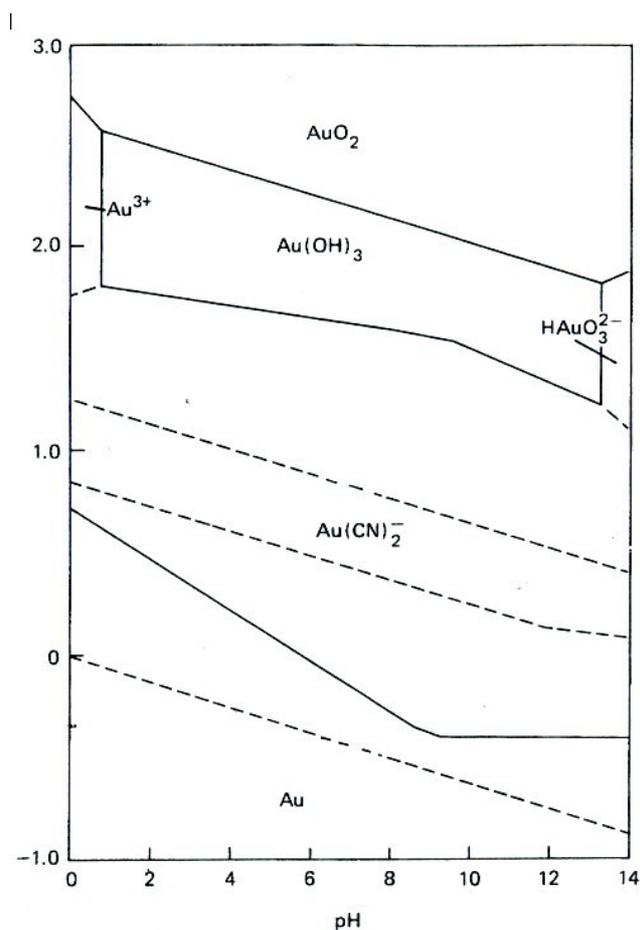
**Tabla 2.2.-** Constantes de estabilidad para complejos metálicos de cianuro.

**Fuente:** Marsden J. y House L. (7).

Los complejos metálicos que forma el cianuro pueden formar sales dobles con una variedad de cationes, tales como, Na, K, Ca, NH<sub>4</sub>, y muchos otros iones metálicos. Como por ejemplo, Fe(CN)<sub>6</sub><sup>4-</sup>

### **II.2.3. Disolución de Oro**

En soluciones acuosas cianhídricas el oro es oxidado y disuelto a la forma compleja de cianuro Au(I), Au(CN)<sub>2</sub><sup>-</sup> como se muestra en el diagrama de Eh-pH (figura 2.2)., también se forman las especies de complejo cianuro Au (III), Au(CN)<sub>4</sub><sup>-</sup>, pero el complejo de Au (I) es más estable que el de Au (III) por 0.5 Volteos.



**Figura 2.2-** Diagrama de Eh-pH para el sistema Au-H<sub>2</sub>O-CN<sup>-</sup> a 25°C.

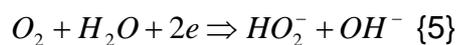
Concentración de todas las especies solubles de oro= 10<sup>-4</sup>M

**Fuente:** Finkelstein N. (15)

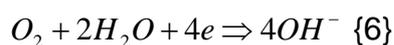
El proceso de cianuración de oro procede vía un mecanismo electroquímico. La reacción anódica del oro procede de acuerdo a la siguiente reacción:



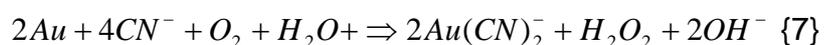
Por otra parte, Según Agamirian y Yen (16) en soluciones alcalinas aireadas la reacción anódica de disolución es acompañada por la reducción del oxígeno en el área catódica. Esta reacción probablemente procede a través de 2 a 4 electrones transferidos como se muestra en las ecuaciones {5}, {6}:

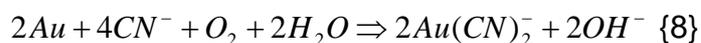


+



La disolución total de oro en soluciones alcalinas aireadas de cianuro, considerando las medias reacciones anódica y catódica, pueden ser descritas por las siguientes ecuaciones, que proceden en paralelo:





#### II.2.4. Efectos de las Variables del Proceso

Son muchas las variables involucradas en el proceso de cianuración. Además de las concentraciones de cianuro y oxígeno, la reacción depende del pH, del grado de liberación del oro, del porcentaje de sólidos en la pulpa, de la agitación, del tiempo de residencia y de la temperatura. Tratándose de una reacción heterogénea, el área de grano expuesto se torna en una variable importante a ser considerada.

La velocidad de reacción de lixiviación crece con un aumento de la concentración de cianuro hasta un punto en que pasa a ser controlada por la difusión de oxígeno, entonces, para grandes concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución de oro depende de la concentración de oxígeno disuelto.

Valores de pH encima de 9,2 deben ser mantenidos durante todo el tiempo de cianuración como un objetivo de evitar la formación de gas cianhídrico. Por otro lado, también la agitación eficiente favorece la

difusión de los agentes de cianuro y oxígeno hasta la interfase de la reacción.

Cuanto más diluida se encuentra la pulpa más favorece el contacto entre el oro y el agente lixivante (cianuro) y mayor es la tasa de solubilización del metal. La velocidad de cianuración de oro aumenta con el aumento de la temperatura hasta 85<sup>0</sup>C. Encima de esta temperatura, la tasa de cianuración disminuye debido a que decrece la solubilidad del oxígeno (10).

### **II.2.5. Cianuración Intensiva**

Según Marsden y House (7), la cianuración intensiva ha sido usada comercialmente para el tratamiento de concentrados gravimétricos de granos gruesos de oro (>14 mesh). La cinética de cianuración es incrementado por el aumento de la concentración de cianuro y oxígeno, y donde es necesario elevar la temperatura y presión. El proceso de cianuración intensiva usa gran cantidad de agentes (altas concentraciones), principalmente cianuro y oxígeno, y algunas veces elevadas temperaturas y presiones, para incrementar el porcentaje de disolución del oro. Ellos son aplicados en materiales de gran valor que pueden justificar su alto costo de tratamiento y su alta recuperación.

Tales materiales no son fáciles de tratar por cianuración convencional por una de las siguientes razones:

- 1 El material contiene grandes partículas de oro que requieren, grandes tiempos inaceptables de lixiviación, bajo las condiciones estándar de cianuración.
- 2 Algo, o todo el oro encapsulado en minerales solubles al cianuro (sulfuros) cuyo porcentaje es incrementado por altas concentraciones de oxígeno y cianuro, o
- 3 Cuando el oro ocurre, en otros minerales que interfieren en los estándares de prácticas de cianuración, como por ejemplo: mercurio, telurios, etc.

### **II.3. Degradación del Cianuro**

#### **II.3.1. Introducción**

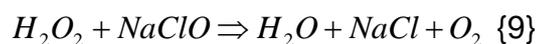
Algunos procesos industriales como los de extracción hidrometalúrgica de oro, las operaciones de flotación de sulfuros y las galvanoplastias utilizan las sales de cianuro, como agentes esenciales para su realización (8).

Muchos métodos de reducción de la concentración de cianuro en efluentes han sido utilizados industrialmente o propuestos como una alternativa técnicamente viable. Las principales dificultades en escoger el proceso adecuado se vinculan en delinear cuales son las especies de cianuro que necesitan ser tratadas y el tipo de adaptación a los procesos ya existentes. Los procesos de tratamientos mas utilizados comercialmente son la oxidación con cloro, ozono o peróxido de hidrógeno. Por otra parte otros agentes oxidantes pueden ser igualmente empleados en la oxidación del cianuro como es el caso de acido monopersulfurico, persulfatos alcalinos. Estos agentes son químicamente eficientes pero su costo es generalmente más elevado (8).

### **II.3.2. Degradación de Cianuro por el Peróxido de Hidrógeno-Hipoclorito de Sodio**

Este método consiste en la utilización conjunta de los agentes hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno, de tal forma que elimine las desventajas existentes en los procesos (8).

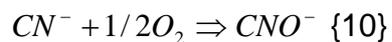
La reacción del peróxido de hidrógeno sobre el hipoclorito de sodio (reacción 9), dentro de las condiciones definidas de pH, da origen a un oxígeno particularmente muy reactivo (17):



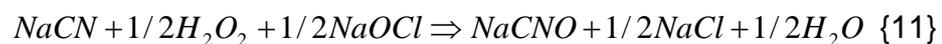
El par  $H_2O_2$ -NaOCl no es el único en permitir la formación de este oxígeno reactivo, que también puede ser obtenido, por ejemplo, por acción de otros compuestos de bromo o de cloro sobre el peróxido de hidrógeno o por ciertos mecanismos fotoquímicos.

No obstante, esta generación a partir de  $H_2O_2$ -NaOCl es más interesante en el tratamiento de aguas residuales, porque emplea dos productos químicos clásicos, de fácil manipulación y poseyendo ellos mismos una función de oxidantes. (17)

La reacción de este oxígeno reactivo (oxígeno "S"- Singlet) (8) sobre los cianuros proporciona una formación de cianatos según la reacción {10}:



Con el par  $H_2O_2$ -NaOCl, la reacción global es la siguiente {11}:



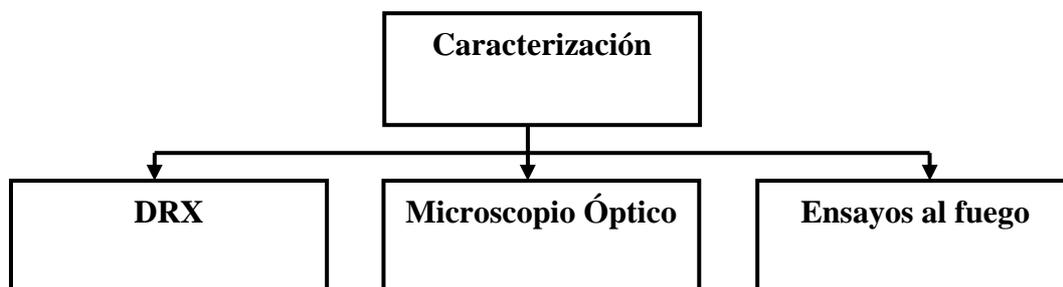
Para generar el oxígeno "S", la adición de los agentes puede ser hecha en cualquier orden. No obstante, en el tratamiento de soluciones cianídricas, es necesario introducir en primer lugar el peróxido de hidrógeno. La adición de hipoclorito de sodio antes del peróxido en un pH inferior a 11 acarrea la formación de cloruro cianógeno, compuesto muy tóxico.

# CAPÍTULO III

## III. MATERIALES Y MÉTODOS

### III.1. Metodología para la Caracterización

Las 4 muestras de minerales de sulfuro extraídas del distrito minero de Ponce Enríquez fueron caracterizadas utilizando la siguiente metodología (Figura 3.1.): Las muestras fueron homogenizadas y cuarteadas, siendo una fracción de las mismas separadas para análisis de difracción de rayos X, para la determinación de las especies minerales y otra fracción para ensayos al fuego (Fire Assay), para determinación de las leyes de oro.



**Fig. 3.1.-** Metodología para la caracterización.

Para el análisis de difracción de rayos X (DRX) se utilizó un equipo Siemens/Brucker – AXS D5005, equipado con espejo de Goebel para eje paralelo de rayos X, detector de Ioduro de sodio (NaI) de estado sólido. La radiación utilizada fue  $\text{Cu K}\alpha$  (40 kV/40 mA); la velocidad del goniómetro fue de  $0,02^\circ$   $2\theta$  por paso con tiempo de cuenta de 1,0 segundo por paso. La interpretación fue efectuada por comparación con patrones contenidos en PDF 02 (ICDD, 1996) en el software Brucker Diffrac<sup>Plus</sup>

### **III.2. Cianuración Intensiva**

La metodología y los cálculos para los ensayos de cianuración, fueron seguidos con base al manual de instrucción de uso para estudios de cianuración del CETEM (17).

### **III.2.1. Procedimiento**

#### **Ensayos de Cianuración Intensiva**

Los pasos seguidos para los ensayos de cianuración intensiva son descritos a continuación:

- 1) Colocar la masa del material a ser lixiviado en un reactor con capacidad adecuada.
- 2) Adicionar el volumen de agua destilada calculada de acuerdo con la relación sólido/líquido.
- 3) Suspender mecánicamente por agitación el material sólido por algunos minutos.
- 4) Marcar el nivel de la pulpa en el reactor e iniciar la agitación de 400 a 600 rpm y para el caso de los ensayos con la adición de oxígeno, iniciar la aireación.
- 5) Medir el pH de la pulpa y adicionar el agente controlador hasta que el pH se estabilice de 9.8 a 10.0. Anotar siempre el peso del frasco que contiene el reactivo después de cada adición, para control del consumo de cal.
- 6) Adicionar la masa de cianuro pesada previamente y anotar la hora de inicio. El cálculo del cianuro se basa en el volumen y

en la concentración de cianuro en la solución. El volumen de la solución, multiplicado por la concentración, es igual a la masa del cianuro a ser utilizada.

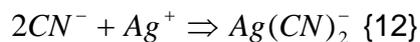
- 7) Retirar 20 ml de muestra en los intervalos de tiempos estipulados para analizar el oro y acompañar el consumo de cianuro, retornando el sólido filtrado al reactor. Adicionar solución de cianuro a la misma concentración inicial en un mismo volumen correspondiente a la alícuota retirada. En el caso de que no pueda ser posible realizar inmediatamente los análisis de los elementos, la muestra debe ser conservada a baja temperatura y en ausencia de luz.
- 8) En cada toma de muestra, anotar el pH de la pulpa.
- 9) Para la Etapa II, después de la determinación de cianuro libre, adicionar cuando sea necesario, la masa de cianuro para mantener la misma concentración inicial.
- 10) Al término del ensayo, retirar la última alícuota para análisis y otra para archivo; dejar la pulpa decantar, filtrar al vacío y colocar en un recipiente sellado y codificado la solución para posteriores análisis y confirmaciones,
- 11) Verter agua caliente sobre el residuo sólido con la intención de neutralizar el cianuro; lavar el residuo con pequeños volúmenes de agua destilada. Al final del lavado el volumen

de agua debe ser el mismo que el volumen utilizado en la lixiviación. (ejemplo: si se utilizo 600 ml en la lixiviación, lávese el material con tres porciones de 200 ml)

- 12) Colocar el residuo sólido para secar en una estufa a 35 °C durante 24 horas.
- 13) Desagregar el material después de seco, homogenizar y cuartear, retirando una muestra para análisis de oro por ensayos al fuego, que deberá ser conminuida a menos de 150 mesh.
- 14) Después de los ensayos, hacer el tratamiento de degradación de cianuro para posterior exclusión de los efluentes.
- 15) Al final del ensayo, determinar el consumo de cianuro durante la lixiviación. Multiplicar la masa de cianuro en gramos por tonelada de mineral y dividir para la masa de mineral usado en toneladas, obteniéndose el consumo de NaCN/tonelada de mineral.

### **Determinación de Cianuro Libre en Solución**

Para la determinación de cianuro libre se utilizó el método titrimétrico que se basa en la formación de un complejo iónico de plata mediante la siguiente ecuación:



Cuando todo el cianuro iónico ( $\text{CN}^-$ ) esté acomplejado con la plata, el exceso de plata es entonces detectado por el indicador rodanina. La rodanina es el indicador más recomendado para el exceso de iones plata. No siempre el punto final es tan pronunciado, pudiendo ser éste mismo emascarado por la presencia de metales pesados (17)

Los pasos a seguir para el análisis de cianuro en muestras que contengan sulfuro se muestra a continuación (18):

1. Tomar un volumen medido de muestra (10 ml)
2. Adicionar 5 ml de solución de nitrato de cadmio 0.5M; aguardar hasta que la sedimentación de un precipitado amarillo finalice. Filtrar con papel de porosidad media, lavando el papel y el residuo con agua desionizada;
3. Completar el volumen de 50 ml con agua desionizada;
4. Adicionar 0.5 ml de rodanina;
5. Homogenizar;

6. Titular con solución de nitrato de plata estandarizada hasta el primer viraje de color, de amarillo canario a rojo ocre.
7. En paralelo, titular un Blanco con las mismas cantidades de agua y de indicador utilizadas en la muestra.
8. Calcular el cianuro libre de la siguiente ecuación que se deduce de la reacción {12}:

$$[NaCN] = \frac{(V_{ga} - V_{gb})[AgNO_3]}{V_c} f$$

Donde:

[NaCN] : Molaridad del Cianuro

[AgNO<sub>3</sub>] : Molaridad del Cianuro

V<sub>ga</sub> : Gasto en ml de nitrato de plata en la muestra.

V<sub>gb</sub> : Gasto en ml de nitrato de plata en el blanco.

V<sub>c</sub> : Volumen en ml de la muestra.

f : Factor de corrección del nitrato de plata

### **Preparación de muestras cianuradas para determinación de oro por AAS.**

Se sabe que el cianuro es una sustancia toxica y de alto costo, y la manipulación de esta sal y de sus soluciones debe ser realizada con bastantes cuidado, siendo imperativo todas las medidas de seguridad

y prevención. Por lo tanto, hay que tomar las debidas precauciones para el personal que va a trabajar con cianuro por causa de su toxicidad, por esta razón es necesario tratar las muestras de las soluciones de cianuro antes de enviarlas para el análisis químico (19). Las muestras ácidas enviadas al laboratorio de Coordinación de Analisis Mineral (COAM) del CETEM fueron analizadas por AAS en medio ácido.

Al bajar el pH a niveles menores que 2 con el ataque ácido se garantiza que no pueda existir especies de cianuro libre y cianuro en forma molecular. Éste es el método más conveniente debido a que produce menor error en los análisis de la muestra. (Ver figura 2.1)

Procedimiento:

1. Colocar los equipamientos de protección individual necesarios y trabajar en el digestor de gases.
2. Tomar 10 ml de muestra con pipeta volumétrica.
3. Transferir para el frasco que será enviado para el análisis.

4. Ajustar el pH con ácido nítrico concentrado hasta pH menores o iguales a dos, utilizando papel indicador de pH y agitando con extremo cuidado el frasco para eliminación de HCN (figura 3.2)
5. Anotar el volumen del ácido adicionado.
6. La solución del blanco debe ser sometida al mismo tratamiento.
7. Calcular el factor de dilución (Volumen de muestra / Volumen ácido) y multiplicar por la concentración del analito.

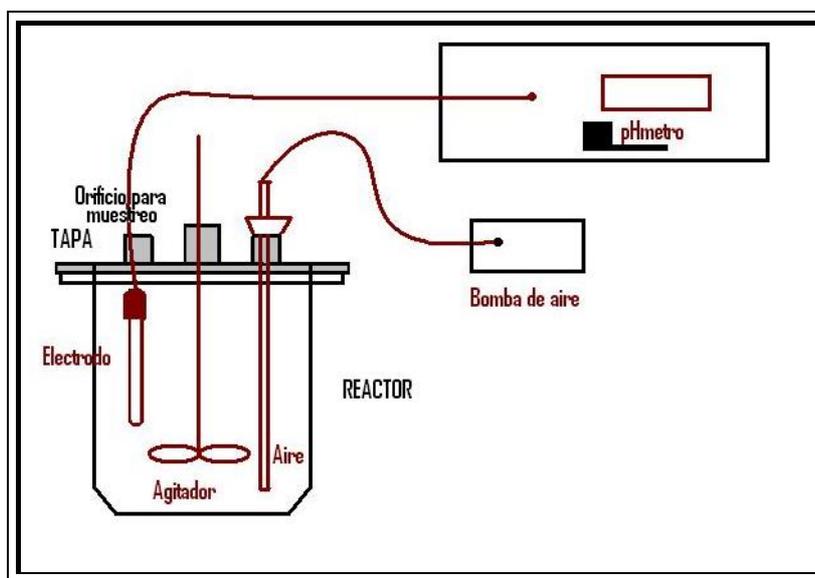


**Fig. 3.2.-** Eliminación de Cianuro en las muestras tomadas en los ensayos de cianuración intensiva.

### III.2.2. Equipos utilizados

Fue utilizado básicamente un sistema reaccional, para estudiar el proceso de cianuración intensiva de las muestras de minerales de

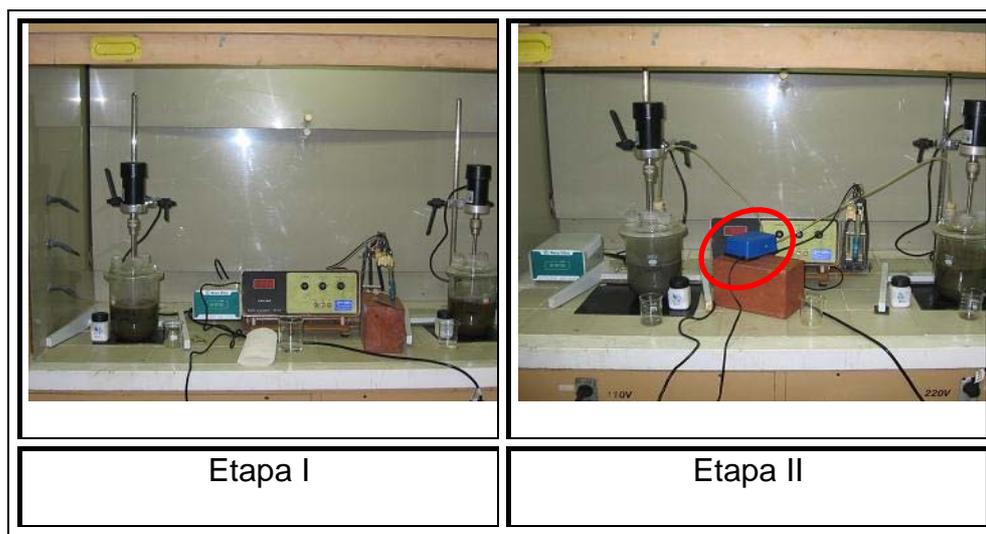
sulfuros con contenido de oro. Básicamente consiste en recipientes de vidrio Pyrex con capacidad de uno o dos litros dependiendo del volumen de pulpa, con tapa de vidrio apropiada con cuatro orificios para permitir la entrada del agitador, la toma de muestras, inyección de aire y medidas de pH. Además, se contó con un agitador mecánico Nova Etica, una bomba de aire y medidor de pH digital PM600 (ver figura 3.3).



**Fig. 3.3.-** Representación grafica del equipamiento.

En la figura 3.4 se puede apreciar las diferencias de cada uno de los sistemas reaccionales. Básicamente, la diferencia que se observa es que en la foto de la derecha (segunda etapa) se puede apreciar la

bomba de aire de color azul y la inyección de oxígeno por una manguera que se conecta a unos de los orificios de la tapa de reactor de vidrio.



**Fig. 3.4.-** Fotos de los equipos utilizados en cada una de las etapas para los ensayos de cianuración intensiva.

### III.2.3. Parámetros

Los ensayos de cianuración intensiva se dividieron en dos etapas:

La primera etapa consistió en tratar el mineral con la granulometría original: porcentaje de sólidos del 17%, concentraciones de NaCN inicial de 13 g/l y NaOH de 1 g/l, donde el pH se mantuvo en 11. El

tiempo de residencia fue de 6 horas sin aireación. A cada hora se tomaron alícuotas de muestra líquida de 10 ml para coleccionar datos y obtener la curva de disolución de oro por análisis de absorción atómica. Por otra parte, cada dos horas se tomaron alícuotas de 10 ml para la determinación del consumo de cianuro por el método titrimétrico (18), usando como agente titulador nitrato de plata y como indicador rodanina al 5%. Durante los ensayos de la primera etapa no se mantuvo la concentración inicial de NaCN.

En la segunda etapa se trató el mineral con granulometría -150 mesh, porcentaje de sólidos del 17%, concentraciones de NaCN inicial de 13 g/l. El pH de 10.5 se controló con la adición de cal. El tiempo de residencia fue de 24 horas con aireación. Las alícuotas de 10 ml de muestras líquidas fueron tomadas a cada cierto periodo de tiempo para coleccionar datos y obtener la curva de disolución de oro y para la determinación del consumo de cianuro. Durante los ensayos de la segunda etapa se mantuvo la concentración inicial de NaCN.

Finalmente, para todos los ensayos, el residuo líquido fue filtrado y guardado en botellas codificadas para posteriores confirmaciones y ensayo de degradación de cianuro. Entre tanto, el residuo sólido fue

lavado con agua destilada caliente y secado en una estufa a 35<sup>0</sup>C para análisis de tenor de oro.

La tabla 3.1 muestra en resumen los parámetros de cada una de las etapas de los ensayos de cianuración intensiva.

<i>Variable</i>	<i>Etapa I</i>	<i>Etapa II</i>
[CNNa] inicial (g/L)	13	Variable
[CNNa] inicial mantenida	No	Si
Aireación	No	Si
pH	11.0	10.5
Controlador de pH	NaOH	CaO
Tamaño de grano	Original	-150 mesh
Porcentaje de sólidos (%)	17	17
Tiempo de residencia (h)	6	24
Temperatura (C <sup>0</sup> )	25	25

**Tabla 3.1.-** Parámetros de cada una de las dos etapas de Cianuración Intensiva.

### III.3. Degradación de Cianuro

Para la eliminación de desechos líquidos recogidos en botellas en el laboratorio, se adiciona inicialmente peróxido de hidrógeno y en seguida hipoclorito de sodio o calcio, conforme a las reacciones {10} y {11}, por

medida de seguridad se introduce un ligero exceso de peróxido de hidrógeno en relación al hipoclorito.

Este método permite una eliminación rápida de los cianuros, independiente de su concentración, sin ajuste de pH y con más bajo costo de tratamiento entre las diferentes técnicas de oxidación.



**Fig. 3.5.-** Reacción de la degradación de cianuro, después de añadido los reactivos, con agitación constante.

En el tratamiento de cianuros es necesario introducir el peróxido de hidrógeno, pues la adición de hipoclorito de sodio antes del peróxido de hidrógeno, a un pH inferior a 11, puede promover la formación y desprendimiento de cloruro cianógeno. (17).

# **CAPÍTULO IV**

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este trabajo de investigación fueron obtenidos importantes resultados en el proceso de liberación de oro de cuatro muestras distintas de sulfuros auríferos, provenientes de las industrias del distrito minero de Ponce Enríquez.

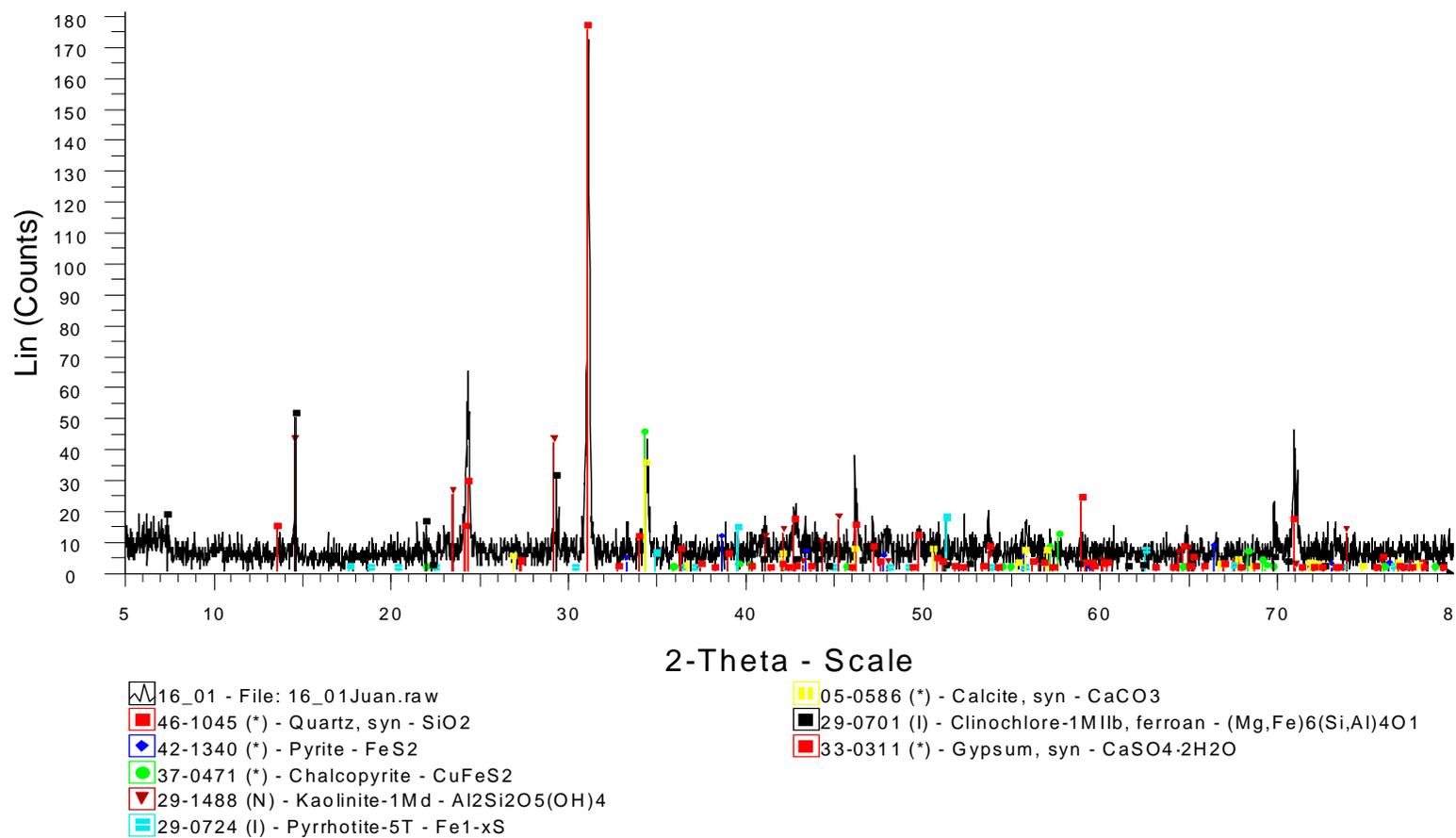
Para un mejor tratamiento de los resultados, los tenores de oro de cada una de las muestras sólidas y líquidas analizadas en el COAM, se presentan en el anexo 1 y en las tablas del anexo 2 los controles de consumos de reactivos y valores de pH de los ensayos.

## **IV.1. Caracterización**

### **IV.1.1. Muestra de Mineral de Cabeza (JG-01)**

Los ensayos al fuego mostraron leyes de Au de 25.7 g/t, para la muestra de mineral de cabeza de la concesión Santa Martha (JG-01). Además, se estima por análisis en el microscopio óptico, una composición de 85% de cuarzo, 5% de pirita y 5% de minerales de óxidos e hidróxidos de hierro como sus principales constituyentes.

Los análisis por DRX caracterizaron cuarzo como especie mineralógica predominante (mineral de ganga), y pirita como las principales fases constituyentes de la muestra. En la fracción por debajo de 0.075 mm, el análisis de DRX caracterizó otras especies mineralógicas como es el caso de calcopirita, pirrotina, yeso, calcita clinocloro y caolinita (figura 4.1).

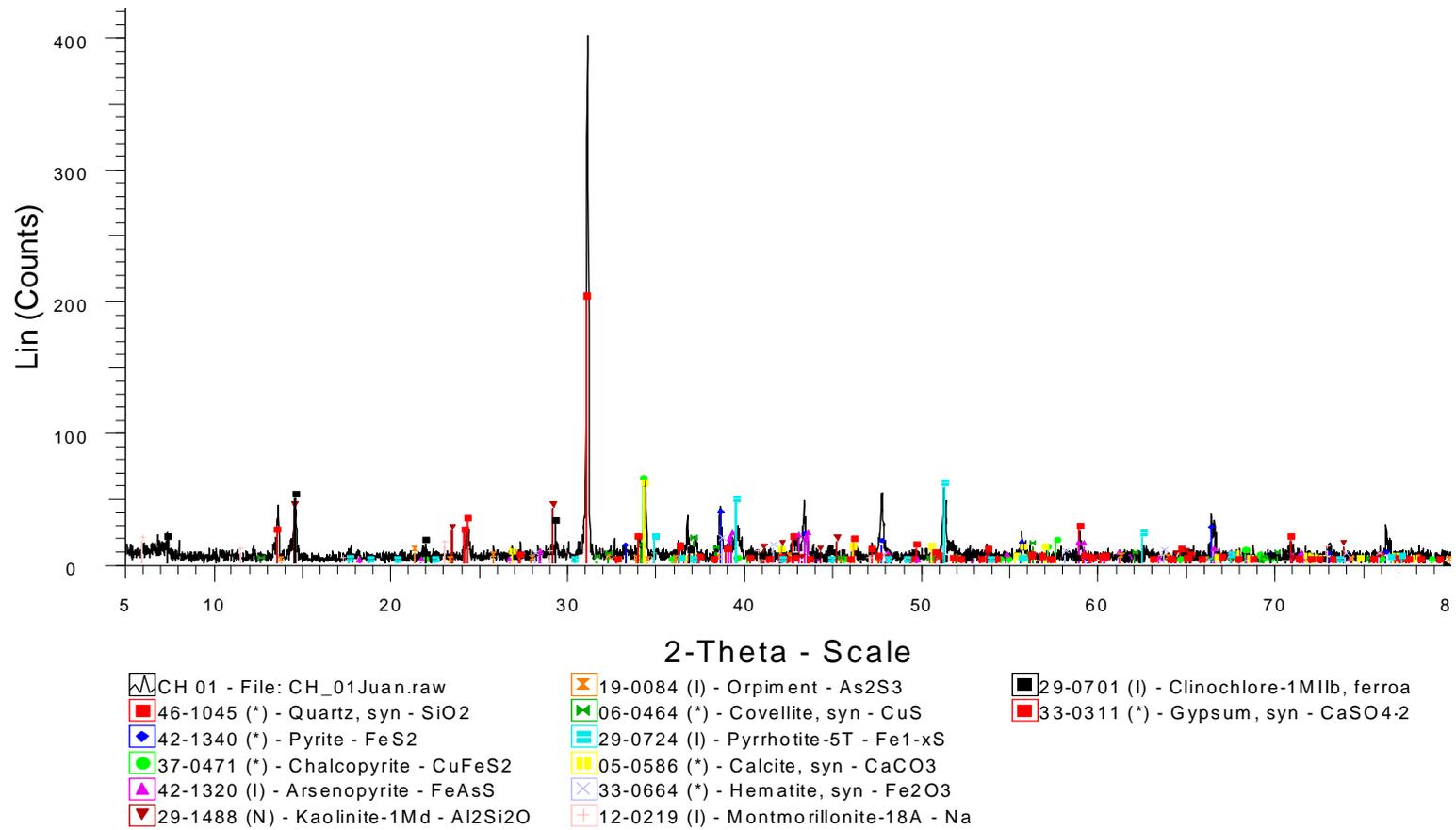


**Fig. 4.1.-** Diffractograma de la muestra JG-01.

#### **IV.1.2. Muestras de Cola de Cianuración de Bella Rica (CH-01)**

Los ensayos al fuego mostraron leyes de oro de 9.7 g/t, para la muestra de cola de cianuración del distrito minero de Bella Rica (CH-01). Además, se estima por análisis en el microscopio óptico, una composición de 80% de cuarzo, 10% de pirita y 2% de Pirrotina como sus principales constituyentes.

Los análisis por DRX caracterizaron cuarzo como especie mineralógica predominante (mineral de ganga), y pirita como las principales fases constituyentes de la muestra. En la fracción debajo de 0.075 mm el análisis de DRX caracterizó otras especies mineralógicas entre estas están la calcopirita, pirrotina, covelina, hematita, arsenopirita, yeso, calcita, caolinita, oropimente, montmorillonita y clinocloro (figura 4.2).

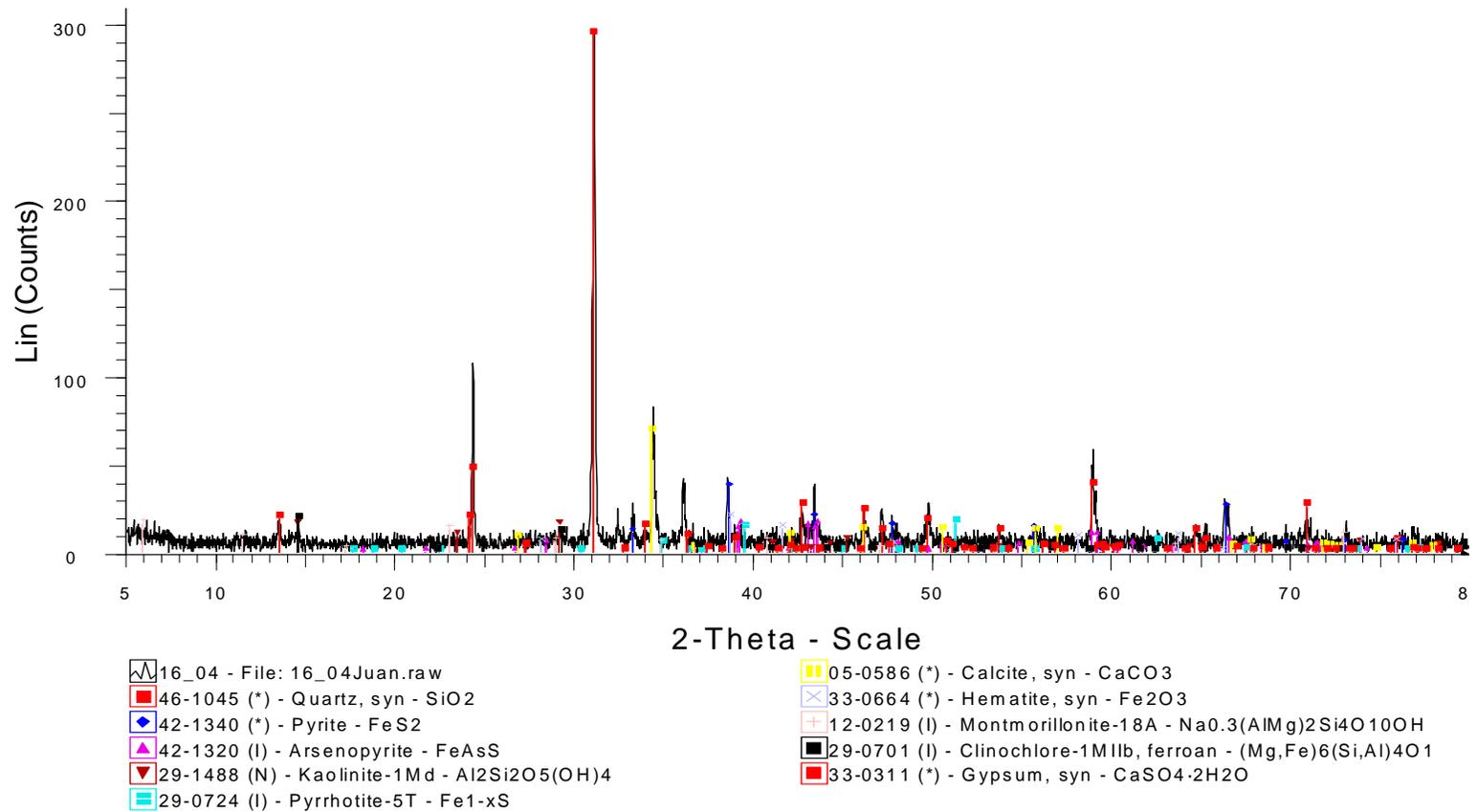


**Fig. 4.2.-** Difractograma de la muestra CH-01.

#### **IV.1.3. Muestra de Cola de Cianuración de Santa Martha (JG-04)**

Los ensayos al fuego mostraron leyes de oro de 14.8 g/t, para la muestra de cola de cianuración de la concesión Santa Martha (JG-04). Además, se estima por análisis en el microscopio óptico, una composición de 85% de cuarzo, 5% de pirita y 5% de minerales óxido e hidróxido de hierro como sus principales constituyentes.

Los análisis por DRX caracterizaron cuarzo como especie mineralógica predominante (mineral de ganga), y pirita como las principales fases constituyentes de la muestra. En la fracción por debajo de 0.075 mm, el análisis de DRX caracterizó otras especies mineralógicas como son calcopirita, pirrotina, hematita, yeso, calcita, caolinita, montmorillonita y clinocloro (fig. 4.3).

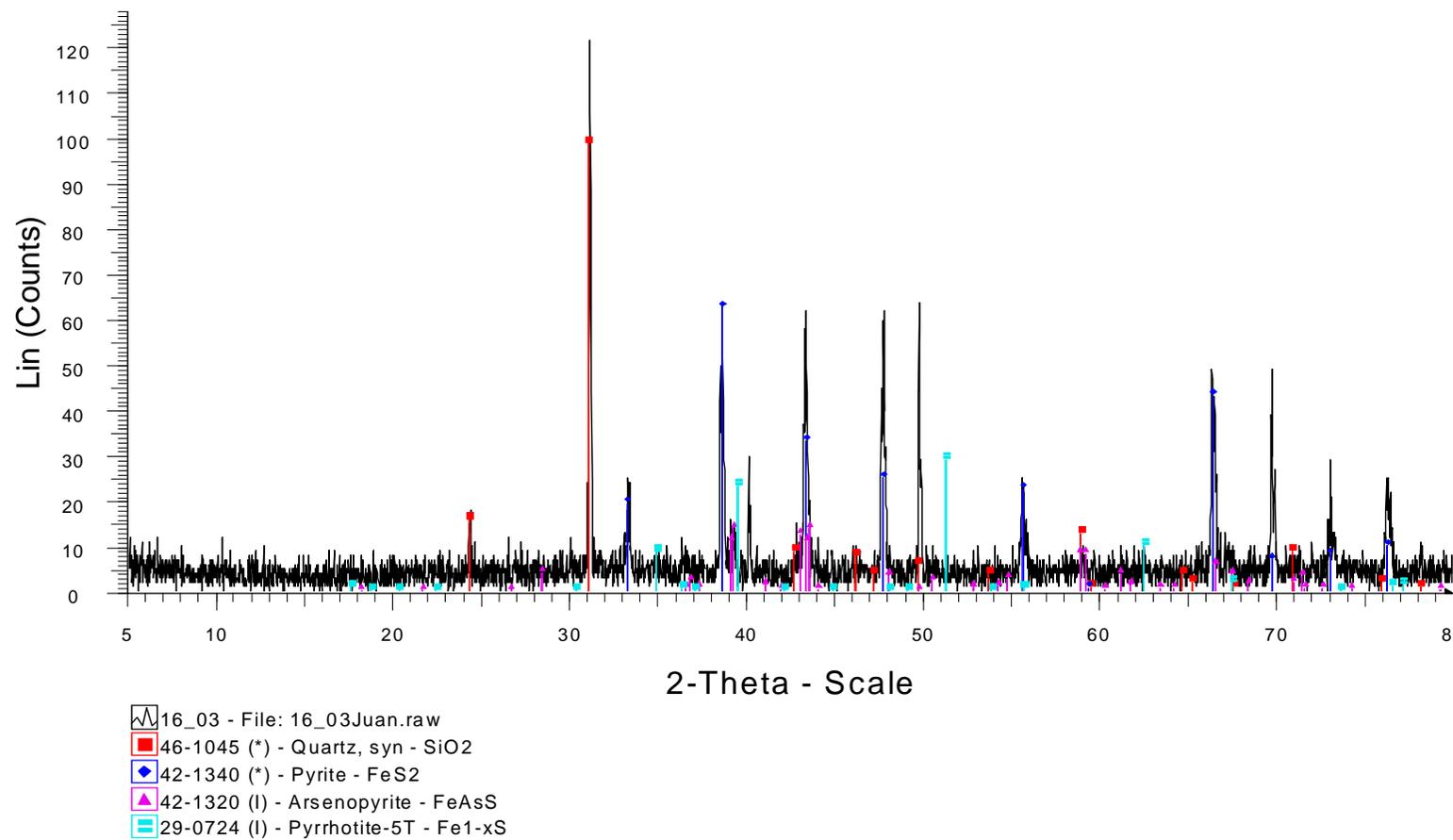


**Fig. 4.3.-** Diffractograma de la muestra JG-04.

#### **IV.1.4. Muestra de concentrado de flotación (JG-03)**

Los ensayos al fuego mostraron leyes de la muestra de concentrado de flotación de oro de 46.7 g/t, para la muestra de concentrado de flotación (de la muestra de cabeza) del distrito minero Santa Martha (JG-03). Además, se estima por análisis en el microscopio óptico, una composición de 75% de pirita y 20% de cuarzo como sus principales constituyentes.

Los análisis por DRX caracterizaron pirita como especie mineralógica predominante y arsenopirita como las principales fases constituyentes de la muestra. En la fracción por debajo de 0.075 mm, el análisis de DRX caracterizó también pirrotina (ver figura 4.4).



**Fig. 4.4.-** Diffractograma de la muestra JG-03.

Las tablas 4.1 y 4.2 muestran en resumen las principales especies minerales, los tenores de oro y la granulometría original (ver anexo 1).

<b>Código</b>	<b>Composición Mineralógica</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Abundancia (%)</b>
CH-01	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	80
	Pirita	FeS <sub>2</sub>	10
	Pirrotina	Fe <sub>1-x</sub> S	2
JG-01	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	85
	Pirita	FeS <sub>2</sub>	5
JG-03	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	20
	Pirita	FeS <sub>2</sub>	75
JG-04	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	85
	Pirita	FeS <sub>2</sub>	5

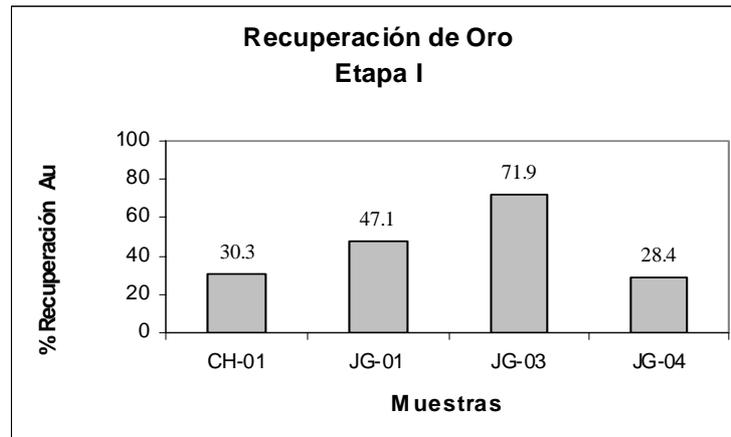
**Tabla 4.1.-** Principales especies minerales y su abundancia en las muestras originales.

<b>Código</b>	<b>Tenor Oro (g/t)</b>	<b>D<sub>80</sub> (um)</b>
CH-01	9.4	225
JG-01	25.7	150
JG-03	46.7	75
JG-04	14.8	150

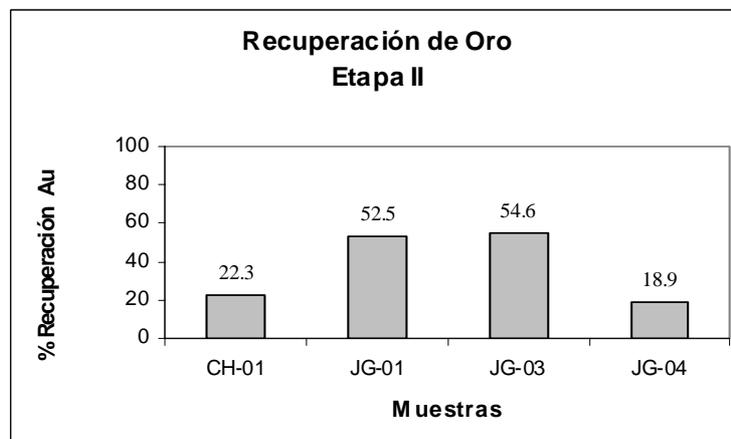
**Tabla 4.2.-** Tenores de oro y tamaño de grano de las muestras originales.

#### **IV.2. Recuperación de Oro de los Materiales Lixiviados.**

Para la determinación del porcentaje de recuperación de oro para cada una de las etapas, se tomaron como referencia los resultados de los ensayos al fuego de las muestras originales y de los residuos sólidos de los ensayos de cianuración (ver anexo 1), estos se encuentran representados en la figura 4.5 para la etapa I y figura 4.6 para la etapa II como un histograma de barras marcados con sus respectivos porcentajes para cada una de las muestras.



**Fig. 4.5.-** Recuperación de oro para cada una de las muestras minerales en la etapa I.



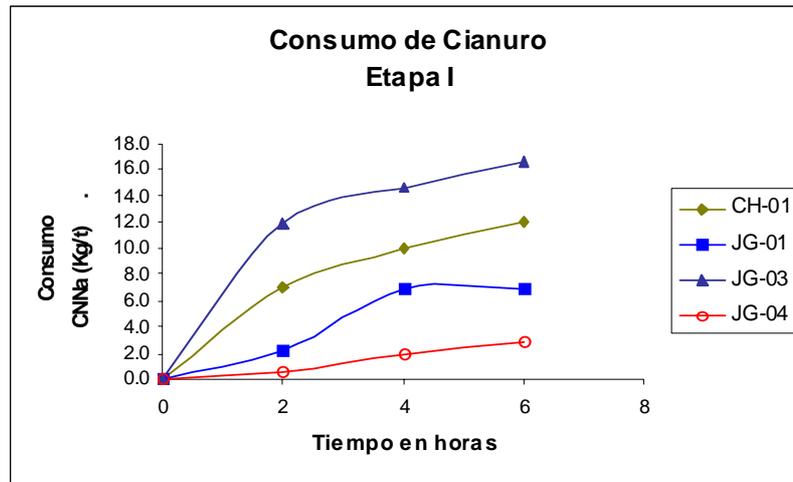
**Fig. 4.6.-** Recuperación de oro para cada una de las muestras minerales en la etapa II.

### **IV.3. Efecto de la concentración de Cianuro, Oxígeno y nivel de pH.**

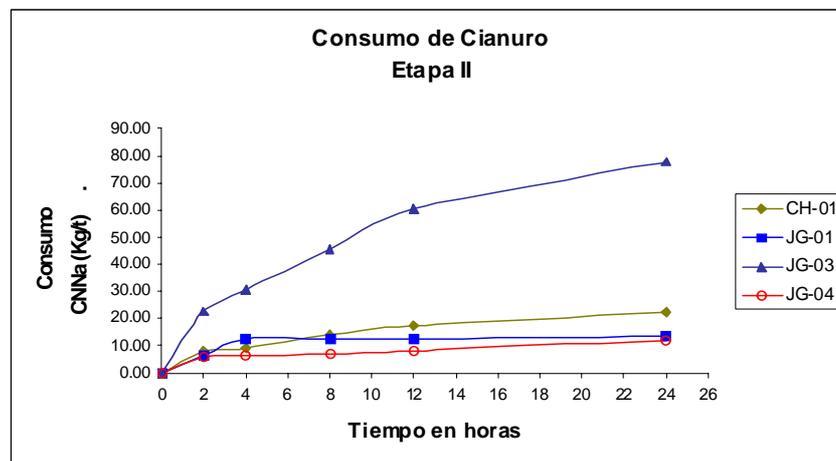
Liu y Yen (20) en su trabajo demostraron que, el comportamiento de disolución de oro en presencia de minerales sulfurosos en la lixiviación con cianuro, depende fuertemente de la solubilidad de los sulfuros y de la concentración de oxígeno en la solución. Aparentemente no se produjo una buena disolución de oxígeno en las pruebas.

Por otra parte, en la segunda fase de los ensayos, el tiempo de residencia aumentó a 24 horas. Cuando el pH aumentó dentro de los límites no permitidos mayores a 11, se elevó el consumo de cianuro libre, efecto producido por la hidrólisis, debido a que los ensayos no fueron de corrido y en la noche no se efectuó el control de pH. Esto y la disolución de agentes cianicidas explica en parte el consumo de iones cianuro representado en las figuras 4.7 y 4.8 (ver anexo 2).

No obstante, en la segunda etapa, la adición de cianuro libre no promueve la disolución de oro, pero favorece la disolución del cobre. Esto se pudo apreciar por la intensidad del color azul (característico del cobre) luego del ataque ácido para degradar el cianuro y enviar las muestras a analizar al COAM.



**Fig. 4.7.-** Consumo de Cianuro en las muestras de la etapa I, con pH 11 sin aireación, y tiempo de residencia de 6 horas. (Ver anexo 2)



**Fig. 4.8.-** Consumo de Cianuro en las muestras de la etapa II, con pH 10.5, con aireación y tiempo de residencia de 24 horas

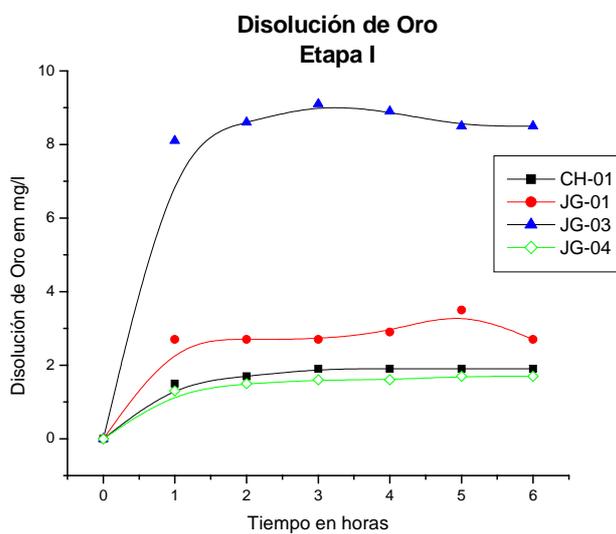
En la primera etapa se controló el pH con NaOH, reactivo más soluble y caro que la cal utilizada para la segunda etapa. En general el pH se mantuvo en los ensayos y el consumo en las muestras CH-01, JG-01, JG-03 y JG-04 fue de 0.28, 0.35, 2.85, 0.38 Kg/t de cal respectivamente para las pruebas en la segunda etapa.

La aireación de la pulpa, generada por una bomba de aire, no cumplió el efecto de generar una buena transferencia de oxígeno en la pulpa y por consiguiente una buena disolución de oxígeno en ésta.

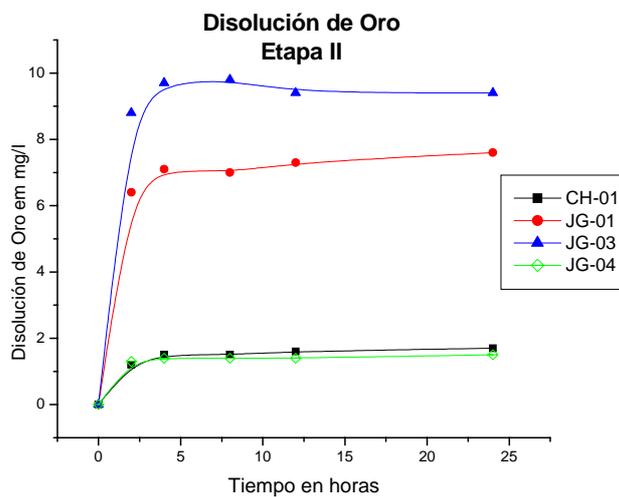
#### **IV.4. Efecto del tiempo de residencia**

Las figuras 4.9 y 4.10, muestran la cinética de disolución de oro para las diferentes concentraciones de cianuro de cada una de las muestras minerales y, observando a éstas, se interpreta que un buen tiempo de residencia de las muestras para una cianuración intensiva es de 6 horas. Prácticamente, poca es la disolución de oro y alto el consumo de cianuro después de las primeras 6 horas. Otra información importante que se puede obtener de las gráficas, es que se demuestra que hasta un cierto límite, para altas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución de oro aumenta en función de la cantidad de oxígeno disuelto en la

solución. En este caso, la inyección de aire no fue la suficiente para poder oxidar una mayor cantidad de sulfuros.



**Fig. 4.9.-** Comportamiento de la disolución de oro en los ensayos de la primera etapa.



**Fig. 4.10.-** Comportamiento de la disolución de oro en los ensayos de la segunda etapa.

#### **IV.5. Efecto de la granulometría de las muestras**

Para el caso de la muestra JG-01, la conminución de ésta, produjo un aumento en la recuperación. Esto se puede apreciar más en detalle observando la figura 4.6. Para el resto de las muestras, prácticamente ésta variable no tuvo influencia; probablemente ocurrió uno de los siguientes casos: o el mineral de interés se encuentra finamente ocluido dentro de los minerales de ganga como es el caso del cuarzo, o el caso más probable es que éste se encuentre dentro de la estructura de los sulfuros, ya que ésta no fue abierta completamente. La muestra JG-03 no fue reducida de tamaño, porque ya estaba a la granulometría propuesta para el ensayo.

Por otra parte, la disminución de tamaño del 100% a -105 micras, liberó más sulfuros y causó que el consumo de cianuro se incrementara hasta un 50%. El caso de la muestra JG-01 demuestra que en la primera etapa el consumo a las 6 horas fue de 7.5 Kg./t contra un 15 Kg./t en el mismo tiempo para los ensayos de la segunda etapa.

#### **IV.6. Costo del Proyecto**

Uno de los objetivos de este proyecto es implementar la tecnología desarrollada en las empresas del sector minero de Ponce Enríquez. En esta parte, se evalúan las variables que modifican el costo de operación como son: la adición de reactivo y el tiempo de residencia, es decir, calcular un costo estimado de operación.

Para la planta de cianuración se utilizará el mineral de Ponce Enríquez, y se reproducirán las condiciones en las que se han realizado los análisis de laboratorio para la muestra JG-01 mineral de cabeza, concentración de cianuro de sodio de 6.5 k.o./t y cal 1 Kg./t.

El tiempo de residencia de la pulpa será de 6 horas (ver tabla 4.3). Actualmente el costo de cianuración y adsorción de oro con carbón en pulpa es 25 USD/m<sup>3</sup> (21), proceso que lleva un período de 9 horas de lixiviación y 7 horas de adsorción.

<b>Variable</b>	<b>Parámetros</b>	
	<b>COMIMACH S.A.</b>	<b>Cianuración Intensiva (muestra JG-01)</b>
[CNNa] inicial (Kg/t)	1	6.5
[CNNa] inicial mantenida	Si	No
Aireación	Si	Si
pH	11.0	10.5
Controlador de pH	CaO	CaO
Tamaño de grano ( $\mu\text{m}$ )	225	105
Porcentaje de sólidos (%)	45	17
Tiempo de residencia (h)	9	24
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	25	25

**Tabla 4.3.-** Comparación de los parámetros de cianuración desarrollados por COMIMACH S.A. vs cianuración intensiva

Los datos para el cálculo de los costos de operación se presentan en la tabla 4.4., donde se presentan éstos cambiados a las unidades requeridas para el cálculo.

<b>Costos*</b>	<b>Valor (USD/t)</b>
Costo <sub>operación/ 16 horas</sub>	16.70
Costo <sub>operación/ 13 horas</sub>	13.56
Costo <sub>reactivos</sub>	47.50
CNNa	1.90**

Datos proporcionados por la empresa COMIMACH S.A., \*\* (USD/kg)

**Tabla 4.4.-** Datos para el calculo de costo de operación

Suponiendo que las condiciones de adsorción sean las mismas en los dos casos y que no hubiesen alteraciones en el precio, se tiene que:

**Costo total de Operación:**

$$\text{Costo}_{\text{operación}} = \text{Costos}_{\text{directos}}$$

$$\text{Costo}_{\text{operación I}} = \text{Costo}_{\text{reactivos}} + \text{Costo}_{\text{total / 13 horas}}$$

$$\text{Costo}_{\text{operación}} = 47.5 + 13.56$$

$$\text{Costo}_{\text{operación}} = 61.06 \text{ USD/t}$$

De la misma forma se efectuó el cálculo en las otras muestras. La tabla 4.5 resume los costos de operación junto con la cantidad de oro disuelto para cada una de las muestras ensayadas.

<b>Muestra</b>	<b>Costo (USD/t)</b>	<b>Oro Disuelto (g/t)</b>	<b>Oro Disuelto (USD/t)</b>	<b>Utilidad (USD/t)</b>
CH-01*	108.50	2.9	52.2	-56.3
JG-01*	108.50	12.1	217.8	109.3
JG-03*	108.50	33.6	604.08	496.3***
JG-04*	108.50	4.2	75.6	38.35
CH-01**	37.25	2.1	37.80	0.55
JG-01**	61.06	13.5	243	181.94
JG-03**	108.50	25.5	459	350.5***
JG-04**	37.25	2.8	50.4	13.15
<b>COMIMACH</b>	<b>16.70</b>	<b>1.4</b>	<b>25.2</b>	<b>8.5</b>

\*I etapa,

\*\* II etapa

\*\*\*

**Tabla 4.5.-** Costos de operación y oro disuelto en los ensayos

Los valores en negrita corresponden a los ensayos donde el costo de producción es menor al precio total del oro diluido.

#### **IV.7. Análisis Comparativos con las Tecnologías Actuales**

La mayoría de las empresas mineras trabajan con cianuración; en realidad no hay un solo método o tratamiento para aplicar esta tecnología. La cianuración tradicional agrega cianuro en cantidades bajas y para grandes volúmenes la inyección de aire es necesaria. Entonces, para bajas concentraciones de cianuro éste es el factor que interviene en la disolución de las partículas de oro, mientras que para el caso de la cianuración intensiva, es decir con altas concentraciones de cianuro, es importante la adición de oxígeno, porque depende de cuanto éste se oxide en la reacción (atmósfera oxidante) para que sea posible la abertura de los minerales sulfurosos y la disolución de oro.

La tecnología aplicada actualmente en COMIMACH S.A., se ha tomado como referencia de una operación industrial de cianuración convencional que se realiza en el distrito minero de Ponce Enríquez (21). La tabla 4.3 muestra una comparación de los parámetros de la cianuración de COMIMACH S. A. y la tecnología desarrollada en este proyecto.

Hay que tomar en cuenta además, que en este trabajo los ensayos de cianuración intensiva fueron hechos con muestras de colas de relaves de

cianuración de COMIMACH, donde se pudo disolver hasta un 30% más de oro.

Como otro dato importante para el concentrado de flotación (JG-03), se alcanzaron porcentajes de recuperación del 71.9 %, mucho mayores a los que se están alcanzando actualmente en la región.

El precio del oro cerró el 20 de enero del 2006 en 559.80 USD la onza troy (23), si los tenores y el precio de oro se mantienen en ese rango, este método resulta conveniente para su aplicación.

En resumen, los mejores resultados se presentaron en los ensayos de la primera etapa con el método de cianuración intensiva, en el ensayo de las muestras CH-01, JG-03, JG-04 con recuperaciones de 30.3%, 71.9%, 28.4 %, respectivamente; mientras que, para la muestra JG-01, la conminución de ésta resultó en un aumento en el porcentaje de recuperación de 47.1% a 52.5%.

En referencia a la tabla 4.5, el método de cianuración intensiva tiene un mayor costo y cantidad de disolución de oro, pero en un balance general tiene una utilidad mayor, de tal forma que resulta conveniente implantar la tecnología impuesta en este trabajo.

# CONCLUSIONES

## V.1. Conclusiones y Recomendaciones

En el presente trabajo se realizó la caracterización de 4 muestras minerales de dos tipos de yacimientos. De los resultados de los análisis efectuados por DRX, análisis en el microscopio y ensayos al fuego se puede concluir que:

- La muestra original de la concesión minera de Santa Martha, mineral de mina (JG-01) posee un tenor de oro de 25.7g/t y se ha determinado la presencia de pirita, calcopirita, calcita, yeso; y como mineral más abundante el cuarzo.
- En la muestra CH-01 (cola de cianuración de Ponce Enríquez), el tenor de oro es de 9.7 g/t y se ha determinado la presencia de minerales accesorios como: cuarzo, pirita, calcopirita, pirrotina, covelina, hematita, arsenopirita, yeso y calcita.

- En la muestra de cola de cianuración de Santa Martha (JG-04), la ley de oro es de 14.8 g/t. Además se ha determinado la presencia de los siguientes minerales accesorios: pirita, calcopirita, pirrotina, hematita, yeso, calcita y cuarzo.
  
- En la muestra de concentrado de flotación (JG-03) del mineral de mina de la concesión minera de Santa Martha, presenta una ley de 46.7g/t y se estima un contenido promedio de: 75% de pirita, 20% de cuarzo, además de trazas de pirrotina y arsenopirita.
  
- Comparando la ley de oro de la muestra de cabeza y de las colas de cianuración de una misma mina, se determina que, en general, las recuperaciones son menores del 50%.

Por otra parte, de los ensayos de cianuración intensiva, se puede concluir que:

- Las recuperaciones para la muestras CH-01, JG-01, JG-03 y JG-04 alcanzan un porcentaje de: 30.3%, 47.2%, 71.9% y 28.4% respectivamente en la Etapa I; mientras que para la etapa II, éstas son: 22.3%, 52.5%, 54.6% y 18.9%, respectivamente.

- De acuerdo a las graficas 4.8 y 4.10 se concluye que, los tiempos óptimos para obtener las mejores recuperaciones en los ensayos de cianuración intensiva son seis horas. Al prolongar éste tiempo, resulta un incremento del consumo de cianuro y una disminución de la concentración de oro en la solución.
  
- Al comparar los resultados obtenidos en las dos etapas de cianuración intensiva se ha podido determinar que al bajar la concentración de cianuro también se disminuye la disolución de oro, lo que queda demostrado del análisis de los resultados de los ensayos de la muestras CH-01, JG-04.
  
- El efecto del prelavado para la eliminación de sólidos en suspensión resulto negativo, al obtener en la muestra JG-03 ensayada, una menor recuperación de oro.
  
- Se ha determinado que la disminución del tamaño de grano, libera en una mayor cantidad minerales sulfurosos del cuarzo pero, se incrementa el consumo de cianuro.

- Los resultados obtenidos en los ensayos de cianuración intensiva, confirman que las muestras de mineral tratado son altamente refractarias.
  
- Se obtuvieron mejores recuperaciones de oro para la muestra de cabeza mediante el método de cianuración intensiva; pero, se consume mayores cantidades de reactivos. Esto último se debe a que se trabajó con dos minerales diferentes: un mineral con mayor presencia de sulfuros (concentrado de flotación) y con muestras que ya han sido cianuradas. Por lo tanto, no se puede hacer una comparación, aunque existan similitudes en el proceso.
  
- Al observar los costos de operación y sus utilidades, si los tenores y el precio de oro se mantienen en ese rango, este método resulta interesante para su aplicación.

Una vez finalizado el proyecto se recomienda:

- Trabajar con concentrado de las muestras y continuar con los ensayos de cianuración intensiva para optimizar las variables de concentración de cianuro y densidad de sólidos en la pulpa.

- Realizar ensayos en escala piloto para probar la tecnología desarrollado en este trabajo.
- Realizar un estudio económico exhaustivo considerando parámetros reales de recuperaciones, realizando muestreos sistemáticos y varias pruebas de cianuración para de esta manera, obtener el costo aproximado a la realidad y poder proponer la metodología apropiada par este tipo de procesos.
- Realizar una estimación de reservas de los materiales que se encuentran en las piscinas de relaves de cianuración en el distrito minero de Ponce Enríquez.
- Realizar un muestreo sistemático de los yacimientos estudiados para determinar un valor real de la ley de la mina.
- Determinar la cantidad de cianuro degradado en los efluentes de cianuración intensiva.

## V.2.Nuevas Líneas de Investigación

- Concentrar por flotación las colas de relaves de cianuración de los dos yacimientos, el mineral de mina y efectuar nuevos análisis de cianuración intensiva para la definición de las mejores condiciones del proceso.
  
- Probar métodos de pre-tratamiento para abrir la estructura de los sulfuros y poder disolver el oro que se encuentra encapsulado dentro de la red cristalina de estos minerales.
  
- Aplicar a los materiales de las zonas estudiadas, métodos de pre-tratamiento utilizando nuevas tecnologías que actualmente se están aplicando y en otro caso se encuentran aún en desarrollo, tales como: oxidación bajo presión y lixiviación bacteriana, (la cianuración intensiva acompañaría a éste proceso en su primera etapa antes del ataque bacteriano).

## **ANEXO 1**

**Tenores de Oro de las Muestras Sólidas y Líquidas  
Analizadas en el COAM-CETEM**

**Resultados 26/07/2005**

<u>Muestras líquidas</u>	<u>Au (mg/L)</u>
JG 01 101	2,2
JG 01 102	2,5
JG 01 103	2,2
JG 01 104	2,8
JG 01 105	3,6
JG 01 106	2,9
JG 01 201	2,7
JG 01 202	2,9
JG 01 203	2,7
JG 01 204	2,4
JG 01 205	2,9
JG 01 206	2,1
JG 03 101	6,1
JG 03 102	6,8
JG 03 103	7,8
JG 03 104	7,5
JG 03 105	6,6
JG 03 106	7,8
JG 03 201	8,6
JG 03 202	8,1
JG 03 203	9,1
JG 03 204	8,5
JG 03 205	9,2
JG 03 206	7,5
JG 03 301	8,0
JG 03 302	9,3
JG 03 303	8,3
JG 03 304	8,9
JG 03 305	8,1
JG 03 306	8,1
JG 04 101	1,1
JG 04 102	1,5
JG 04 103	1,6
JG 04 104	1,6
JG 04 105	1,7
JG 04 106	1,6
JG 04 201	1,4
JG 04 202	1,4
JG 04 203	1,5

JG 04 204	1,6
JG 04 205	1,7
JG 04 206	1,7
BRANCO	0,4

### Resultados 13/09/2005

<u>Muestras líquidas</u>	<u>Au (mg/L)</u>
CH-01-101	1,4
CH-01-102	1,6
CH-01-103	1,9
CH-01-104	2,0
CH-01-105	1,9
CH-01-106	1,9
JG- 01-201	1,5
CH-01-202	1,7
CH-01-203	1,8
CH-01-204	1,8
CH-01-205	1,8
CH-01-206	1,9
BRANCO	0,85

### Resultados 20/09/2005

<u>Muestras líquidas</u>	<u>Au (mg/L)</u>
CH-01-106	3,8
BRANCO	0,85

### Resultados 29/09/2005

<u>Muestras sólidas</u>	<u>Au (mg/Kg)</u>
CH-01	7,6
CH-01 Cont.Am	10,9
JG-03-1	16,2
JG-03-3	10,0

## Resultados 04/10/2005

<u>Muestras sólidas</u>	<u>Au (mg/Kg)</u>
CH-01-1	6,6
CH-01-2	6,8
JG-01 Cont.Am	27,2
JG- 01	24,2
JG-01-1	13,1
JG-01-2	13,7
JG-03	58,8
JG-03 Cont.Am	34,7
JG-04	14,8
JG-04 Cont.Am	14,7
JG-04-1	11,8
JG-04-2	14,0

## Resultados 25/11/2005

<u>Muestras líquidas</u>	<u>Au (mg/L)</u>
JG 03 401	9,7
JG 03 402	10,1
JG 03 403	10,7
JG 03 404	10,1
JG 03 405	11,6
JG 04 301	1,3
JG 04 302	1,4
JG 04 303	1,4
JG 04 304	1,4
JG 04 305	1,5
CH 01 301	1,2
CH 01 302	1,5
CH 01 303	1,5
CH 01 304	1,6
CH 01 305	1,7
JG 01 301	6,4
JG 01 302	7,1
JG 01 303	7,0
JG 01 304	7,3
JG 01 305	7,6
BRANCO	1,2

**Resultados 29/11/2005**

<b><u>Muestras líquidas</u></b>	<b><u>Au (mg/L)</u></b>
JG 03 501	8,8
JG 03 502	9,7
JG 03 503	9,8
JG 03 504	9,4
JG 03 505	9,4
BRANCO	1,0

**Resultados 13/12/2005**

<b><u>Muestras sólidas</u></b>	<b><u>Au (mg/Kg)</u></b>
JG-03-4	18,6

**Resultados 13/12/2005**

<b><u>Muestras sólidas</u></b>	<b><u>Au (mg/Kg)</u></b>
JG-01-3	12,2
JG-03-5	21,2
JG-04-3	12,0
CH-01-3	7,3

## **ANEXO 2**

**Tablas de Control de Consumo de Reactivos y  
Valores de pH de los ensayos**

## ENSAYOS ETAPA I

**Ensayo #:** 1                      **Fecha:** 19/07/05  
**Código Muestra:** JG-03-1      **Reactivos:**  
**Peso Muestra (g) :** 100  
**Vol. Agua Destilada (l):** 0.5

	Peso (g)	Molaridad	
NaOH	1.0499		
NaCN	6.506		
NO <sub>3</sub> Ag		0.2244	0.8976

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Observaciones
8:11	-					Inicio
8:30	9.96					Adición de NaOH
9:00	-		0.2655	6.89	0.00	Adición de CNNa
10:00	10.80					1 Alícuota de 10ml
11:00	11.15	9.6	0.2154	5.61	1.28	2 Alícuotas de 10ml
12:00	11.18					1 Alícuota de 10ml
13:00	11.18	8.8	0.1975	5.14	1.75	2 Alícuotas de 10ml
14:00	-					1 Alícuota de 10ml
15:00	11.3	8.4	0.1885	4.90	1.99	2 Alícuotas de 10ml

**Ensayo #:** 2  
**Código Muestra:** JG-03-2  
**Peso Muestra (g) :** 100.00  
**Vol. Agua Destilada (l):** 0.500

**Fecha:** 12/07/2005

**Reactivos:**

	Peso (g)	Molaridad	
NaOH	1.0499		
NaCN	6.5060		
NO <sub>3</sub> Ag		0.2240	f = 0.8976
NO <sub>3</sub> Ag*		0.2270	f = 0.9080

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Observaciones
8:11	-					Inicio
8:30	9.96					Adición de NaOH
9:00	-		0.2655	6.91	0.00	Adición de NaCN
10:00	10.80					1 Alícuota
11:00	11.20	4.8	0.2159	5.62	1.29	2 Alícuotas
12:00	11.20					1 Alícuota
13:00	11.20	4.7	0.2110	5.49	1.42	2 Alícuotas
14:00	-					1 Alícuota
15:00	11.28	4.5	0.2040	5.31	1.60	2 Alícuotas

Ensayo #: 3 Fecha: 14/07/2005

Código Muestra: JG-01-1

Reactivos:

Peso Muestra (g): 250

Vol. Agua Destilada (l): 1

	Peso (g)	Molaridad
NaOH	2.0664	
NaCN	13.0400	
NO <sub>3</sub> Ag		0.2270

f = 0.9080

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Observaciones
8:31	7.77					Inicio
8:42	12.38					Adición de NaOH
8:50			0.2661	6.92	0.00	Adición de NaCN
9:50	12.12					1 Alícuota
10:50	12.16	4.5	0.2551	6.64	0.29	2 Alícuotas
11:50	12.03					1 Alícuota
13:05	12.02	4.0	0.2289	5.96	0.97	2 Alícuotas
14:05	12.00					1 Alícuota
14:50	11.98	5.4	0.2458	6.40	0.53	2 Alícuotas

Ensayo #: 4 Fecha: 14/07/2005

Código Muestra: JG-01-2

Reactivos:

Peso Muestra (g): 250

Vol. Agua Destilada (l): 1

	Peso (g)	Molaridad
NaOH	2.0387	
NaCN	13.049	
NO <sub>3</sub> Ag		0.2270

f = 0.9080

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Observaciones
8:35	7.73					Inicio
8:42	12.38					Adición de NaOH
9:05			0.2663	6.93	0.00	Adición de NaCN
10:05	12.12					1 Alícuota
11:05	12.04	4.5	0.2551	6.64	0.29	2 Alícuotas
12:05	12.03					1 Alícuota
13:15	12.03	4.1	0.2336	6.08	0.85	2 Alícuotas
14:15	11.98					1 Alícuota
15:05	11.95	4.1	0.2336	6.08	0.85	2 Alícuota

Ensayo #: 5 Fecha: 19/07/2005

Código Muestra: JG-04-1

Reactivos:

Peso Muestra (g) : 200

Vol. Agua Destilada (l): 1

	Peso (g)	Molaridad
NaOH	2.01	
NaCN	13.13	
NO <sub>3</sub> Ag		0.2244

f = 0.8976

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Observaciones
9:20	7.8					Inicio
9:40	12.2					Adición de NaOH
10:00			0.2678	6.97	0.00	Adición de NaCN
11:00	12.00					1 Alícuota
12:00	12.20	10.9	0.2649	6.89	0.08	2 Alícuotas
13:00	12.18					1 Alícuota
14:00	12.18	10.6	0.2576	6.70	0.27	2 Alícuotas
15:00	12.18					1 Alícuota
16:00		10.4	0.2527	6.58	0.39	2 Alícuotas

Ensayo #: 6 Fecha: 19/07/2005

Código Muestra: JG-04-2

Reactivos:

Peso Muestra (g) : 200

Vol. Agua Destilada (l): 1

	Peso (g)	Molaridad
NaOH	2.0444	
NaCN	13.0399	
NO <sub>3</sub> Ag		0.2244

f = 0.8976

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Observaciones
9:20	7.98					Inicio
9:40	12.2					Adición de NaOH
10:00			0.2661	6.92	0.00	Adición de NaCN
11:00	12.00					1 Alícuota
12:00	12.18	5.9	0.2649	6.89	0.03	2 Alícuotas
13:00						1 Alícuota
14:00	12.24	5.8	0.2600	6.77	0.16	2 Alícuotas
15:00	12.25					1 Alícuota
16:00		5.7	0.2576	6.70	0.22	2 Alícuotas

**Ensayo #:** 7  
**Código Muestra:** CH-01-1  
**Peso Muestra (g) :** 250  
**Vol. Agua Destilada (l):** 1

**Fecha:** 30/08/2005

**Reactivos:**

	Peso (g)	Molaridad	
CaO	31.8549		
NaCN	13.0047	0.2654	
NO <sub>3</sub> Ag		0.2552	f =1.0207

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Peso Cal+ frasco (g)	Consumo Cal (g)	Observaciones
8:16	5.20							
8:27	10.60					31.4371	0.4178	
9:27			0.2654	6.90	0.00			Adición de CNNa
10:00	10.72							1 Alícuota de 10ml
10:27		4.4	0.2292	5.96	0.94			2 Alícuotas de 10ml
11:27	10.90							1 Alícuota de 10ml
12:30		4.1	0.2136	5.56	1.35			2 Alícuotas de 10ml
13:30	11.00							1 Alícuota de 10ml
14:30	11.00	3.9	0.2032	5.29	1.62			2 Alícuotas de 10ml

**Ensayo #:** 8  
**Código Muestra:** CH-01-2  
**Peso Muestra (g) :** 250  
**Vol. Agua Destilada (l):** 1

**Fecha:** 30/08/2005

**Reactivos:**

	Peso (g)	Molaridad
Ca O	31.1799	
NaCN	13.003	0.2653
NO <sub>3</sub> Ag		0.2552

f = 1.0207

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Peso Cal+ frasco (g)	Consumo Cal (g)	Observaciones
8:16	5.40							Inicio
8:27	10.56		6.90321008	6.90321008	0	30.8284	0.3515	Adición de Reactivos
9:27								1 Alícuota de 10ml
10:00	10.66							
10:27		4.4	0.2292	5.96	0.94			2 Alícuotas de 10ml
11:27	10.80							1 Alícuota de 10ml
12:30		4.1	0.2136	5.56	1.35			2 Alícuotas de 10ml
13:27	10.98							1 Alícuota de 10ml
14:27	10.90	3.9	0.2032	5.29	1.62			2 Alícuotas de 10ml

## ENSAYOS ETAPA II

**Ensayo #:** 11  
**Código Muestra:** JG-04-3  
**Peso Muestra (g) :** 200.00  
**Vol. Agua Destilada (l):** 1.000

**Fecha:** 16/11/05

**Reactivos:**

	Peso (g)	Molaridad
Ca O		
NaCN	3.2507	0.0663
NO <sub>3</sub> Ag		0.2499

f = 1.0010

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Peso Cal+ frasco (g)	Consumo Cal (g)	Observaciones
8:40	7.80					37.1986		Inicio, Adición de CaO
9:00				1.72577598		37.129	0.0696	Adición de NaCN
9:52	10.30							
11:00	10.39	0.85	0.0425	1.11	1.17			
13:00	10.74	1.3	0.0650	1.69	0.06			No se añadió cianuro
17:00	10.93	1.25	0.0625	1.63	0.19			
20:30	10.97	1.25	0.0625	1.63	0.19			
9:00	10.90	0.95	0.0475	1.24	0.92			

**Ensayo #:** 10  
**Código Muestra:** CH-01-3  
**Peso Muestra (g) :** 200.00  
**Vol. Agua Destilada (l):** 1.000

**Fecha:** 16/11/05

**Reactivos:**

	Peso (g)	Molaridad
Ca O		
NaCN	3.2524	0.0664
NO <sub>3</sub> Ag		0.2499

f = 1.0010

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Peso Cal+ frasco (g)	Consumo Cal (g)	Observaciones
8:40	7.80					37.1986		Inicio, Adición de CaO
9:00				1.72577598		37.129	0.0696	Adición de NaCN
9:52	10.30							
11:00	10.39	0.85	0.0425	1.11	1.17			
13:00	10.74	1.3	0.0650	1.69	0.06			No se añadió cianuro
17:00	10.93	1.25	0.0625	1.63	0.19			
20:30	10.97	1.25	0.0625	1.63	0.19			
9:00	10.90	0.95	0.0475	1.24	0.92			

**Ensayo #:** 13  
**Código Muestra:** JG-03-5  
**Peso Muestra (g) :** 100.00  
**Vol. Agua Destilada (l):** 0.500

**Fecha:** 22/11/05

**Reactivos:**

	Peso (g)	Molaridad
Ca O		
NaCN	6.5067	
NO <sub>3</sub> Ag		0.2499

f = 1.0010

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Peso Cal+ frasco (g)	Consumo Cal (g)	Observaciones
8:00	2.33					36.1951		Inicio, Adición de CaO
7:45	9.00		0.26553814			35.6161	0.579	Adición de NaCN
9:45	10.44	3.45	0.1726	4.49	4.55			
11:45	10.88	4.65	0.2326	6.05	1.61			
15:45	11.08	4.1	0.2051	5.34	2.96			
19:45	11.13	4.1	0.2051	5.34	2.96			acidule hata ph 10,57
7:45	11.30	3.9	0.1951	5.08	3.45			con H2SO4

**Ensayo #:** 14  
**Código Muestra:** JG-01-3  
**Peso Muestra (g) :** 200.00  
**Vol. Agua Destilada (l):** 1.000

**Fecha:** 22/11/05

**Reactivos:**

	Peso (g)	Molaridad
CaO		
NaCN	6.553	
NO <sub>3</sub> Ag		0.2499

f = 1.0010

Hora (hh:mm)	pH	Lect. NO <sub>3</sub> Ag (ml)	[CN <sup>-</sup> ]	CN <sup>-</sup> (g/L)	Consumo NaCN (g/L)	Peso Cal+ frasco (g)	Consumo Cal (g)	Observaciones
8:00	7.51					35.9512		Inicio, Adición de CaO
8:15	9.00		0.13371382			35.8943	0.0569	Adición de NaCN
10:15	10.46	2.15	0.1076	2.80	1.28			
12:15	10.53	2.15	0.1076	2.80	1.28			
16:15	10.73	2.65	0.1326	3.45	0.06			
20:00	10.85	2.65	0.1326	3.45	0.06			
8:15	11.21	2.6	0.1301	3.38	0.18			

## REFERENCIAS

1. Guevara A. y De la Torre E., Importancia de los Estudios Mineralógicos en el Procesamiento de minerales auríferos refractarios. Memorias del Seminario Internacional Minería, Metalurgia y Medio Ambiente, Escuela Politécnica Nacional, 2003, p. 98 -110.
2. Pachaca G., Avila M., Evaluación de las Causas de Refractariedad de un Mineral Aurífero de la Zona de Bella Rica Memorias del Seminario Internacional Minería, Metalurgia y Medio Ambiente, Escuela Politécnica Nacional, 2003, p. 111 -123.
3. Rodríguez B., Estudio Mineralúrgico de Concentración Gravimetría y de Flotación para la Recuperación de Oro a partir de Arenas Cianuradas de la Compañía ORENAS S.A, ESPOL-FICT, 1996,121 p.
4. Holguín B., Pretratamiento por Tostación de Concentrados Sulfurosos de Flotación del Sector de Ponce Enríquez. , ESPOL-FICT, 1996, 65 p.
5. GEOXINSA, Análisis Microscópico de una Muestra Procedente de Ecuador. Informe no Publicado de la Compañía ORENAS S. A. 2005.

6. PRODEMINCA, Depósito Porfíricos y Epi-Mesotermales Relacionados con Intrusiones de la Cordillera Occidental y Real Vol. 4, Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador, 2000, 316 p.
7. Marsden J., House L., *The Chemistry of Gold Extration*, Ed. (Ellis Horwood Series in Metals and Associated Materials 1992), Ore Deposit and Process Mineralogy, 1992, pp 45-92.
8. Sobral L., Granato M., Degradacão de Cianetos Através do Par Peróxido de Hidrógeno / hipoclorito de Sódio, *XV Encontro Nacional de Tratamiento de Minérios e Hidrometalurgia, III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Minera, 1992.*
9. Gómez L., Minería Química, Instituto Tecnológico Geominero de España, 1991.
10. Ciminelli, V., Gomes, A. Princípios da Cianetação, Extração de Ouro: Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente. Trindade, R., Barbosa Filho, O. (Editores), CETEM/MCT, Brasil, 2002, p. 59-94.
11. Shoemaker, R. S., Gold: Quid non mortalia pectoral cogis, auri sacra fames, in *Precious Metals: Mining, Extration and Proccesing*, Ed. Kudryk, V., Corrigan, D A., & Liang, W. W., SME-AIME 4-10, 1984.
12. Mullen T., V., Short history of man and gold. *Mining Engenieering*, Jan.,1998, p.50-56.
13. Weast, R., *Handbook of Chemistry and Physics*, 62nd edn, CRC Press, Florida,1981.

14. Smith, R., Martell A., *Critical Stability Constants*, vol. 4, Plenum Press, New York, N.Y, 1976.
15. Finkelstein, N. P., *The Chemistry of the Extration of Gold from Its Ore, Gold Metallurgy on the Witwatersand*, Ed. Adamson, R. J., Cape & Transvaal Printers Ltd. Cape Town, 1972.
16. Aghamirian M., Yen W., A study of gold anodic behavior in the presence of various ions and sulfide minerals in cyanide solutions, *Minerals Engineering* 18, 2005, p. 89–102
17. Pinheiro A., *Instrução de Uso para Estudos de cianetação, Instrução de trabalho elaborada para o CETEM/MCT*, 2000, 7p.
18. Lenahan W., Nurray-Smith R., *Assay and analytical practice in the South Africam Mining Industry, The chamber of mine of South Africa-SAIMM*, Johannesburg, 1986.
19. Pinheiro A., Monteiro M., Oliveira N., Carneiro M., Da Silva L., *Preparação de amostras cianetadas para determinação de metais por espectrometria de absorção atômica com chama, Instrução de trabalho elaborada para o CETEM/MCT*, 2005, 8p
20. Liu G., and Yent, W., Effects of sulphide minerals and dissolved oxygen on the gold and silver dissolution in cyanide solution, *Minerals Engineering*, Vol. 8, Nos 1/2, 1995, p. 111-123.
21. Encalada V., *Cianuración con carbón en pulpa, Revista Económica de la Cámara de Minería de Machala, CMM01-2004*, 2004, p. 20-21.

22. Longley I., McAllum A., Katsikaro N., Intensive Cyanidation: onsite application of inline leach reactor to gravity gold concentrate, minerals engineering, vol 16, 2003, p. 411-419.
23. <http://www.nytimes.com/aponline/business/AP-Dollar-Gold.html>