

**MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y  
TRATAMIENTO DE MINERALES AUROARGENTIFEROS  
DE LA ZONA MINERA DE SAN MARTIN DE LOBA (MINA  
EL EJE, SUR DE BOLIVAR)**

**HENRY MAURICIO GUERRERO GUTIERREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES.  
BUCARAMANGA**

**2008**

**MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y  
TRATAMIENTO DE MINERALES AUROARGENTIFEROS  
DE LA ZONA MINERA DE SAN MARTIN DE LOBA (MINA  
EL EJE, SUR DE BOLIVAR)**

**HENRY MAURICIO GUERRERO GUTIERREZ**

**Tesis de grado para optar al título de ingeniero metalúrgico.**

**Director**

**Ing. Jesús Moreno Castillo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES.  
BUCARAMANGA  
2008**

A mi Dios señor creador por darme las fuerzas para seguir adelante a pesar de las  
adversidades.

A mis padres por que, por ellos soy quien soy y estoy donde estoy, gracias a su,  
apoyo incondicional.

A mi hermana para que vea en esto una fuente de inspiración.

A mis amigos, con los que conté en esta etapa de mi vida los cuales hicieron,  
fortalecer mi carácter.

A todos mis compañeros y personas que estuvieron junto a mí, para permitir que esto  
fuese realidad.

A los señores Ramiro Rodríguez Y Hernán Bayona por su amistad sincera la cual fue  
un apoyo en esta etapa.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a:

Señora Alba Nory García, administradora de la COMPAÑÍA MINERA EL ZANCUDO, por su constante apoyo y valiosas colaboraciones.

Señor Jhon Wood, presidente de la COMPAÑÍA MINERA EL ZANCUDO, por su infinita confianza.

Señora Alejandra Patricia Alicia Caballero Pinilla, ingeniera metalúrgica de la universidad industrial de Santander, por creer y brindarme su valiosa amistad.

Señor Michael Mendoza, ingeniero metalúrgico de la universidad industrial de Santander, por su generosa colaboración y valiosa amistad.

A los docentes y técnicos de la escuela de ingeniería metalúrgica de la universidad industrial de Santander, por haberme formado profesionalmente.

## CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
INTRODUCCION.....	1
1. OBJETIVOS.....	2
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
2. MARCO TEORICO.....	3
2.1 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL ORO.....	3
2.2 MINERALOGÍA DEL ORO.....	4
2.3 REACTIVOS LIXIVIANTES PARA MINERALES DE ORO.....	5
2.3.1 Estabilidad De Complejos De Oro .....	5
2.3.2 Reacciones De Disolución Del Oro.....	6
2.3.2.1 Agua Regia.....	7
2.3.2.2 Soluciones De Cianuro.....	7
2.3.2.3 Soluciones De Tiourea.....	7
2.3.2.4 Halógenos.....	8
2.3.2.5 Cloruración.....	8
2.3.3 Recuperación Del Oro.....	8
2.3.3.1 Cementación Con Zinc.....	8
2.3.3.2 Electro deposición.....	9
2.4 CARACTERIZACIÓN DE MINERALES DE ORO.....	9

2.4.1 Caracterización Mineralógica.....	10
2.4.1.1 Grupo De Datos Composicionales Y Mineralógicos.....	10
2.4.1.2 Grupo De Datos Geométricos.....	10
2.4.1.3 Grupo De Datos Cuantitativos.....	11
2.4.2 Caracterización Geoquímica.....	11
2.4.2.1 Ensayo Al Fuego Convencional.....	11
2.4.2.1.1 Los fundamentos del ensayo.....	11
2.4.2.1.2 Tostación.....	12
2.4.2.1.3 Fusión y ligoteado.....	12
2.4.2.1.4 Copelación.....	12
2.4.2.1.5 Ataque químico.....	13
2.4.3 Caracterización Metalúrgica.....	13
2.4.3.1 índice de trabajo (Work Index).....	13
2.4.3.2 Análisis granulométrico.....	13
2.4.3.3 Distribución De Oro.....	13
2.4.3.4 Cianuración En Botella.....	14
2.5 BENEFICIO Y TRATAMIENTO DE MINERALES DE ORO.....	14
2.5.1 Beneficio.....	15
2.5.1.1 Trituración.....	16
2.5.1.2 Molienda.....	16
2.5.1.3 Concentración.....	17
2.5.1.4 Concentración gravimétrica.....	17
2.6 PRE-TRATAMIENTOS.....	19
2.6.1 Refractariedad química.....	20

2.6.2 Refractariedad física.....	20
2.6.2.1 Tostación.....	21
2.7 LIXIVIACIÓN.....	22
2.7.1 Variables del proceso.....	24
2.7.1.1 Tamaño de partícula.....	24
2.7.1.2 Concentración de reactivos.....	25
2.7.1.3 Temperatura.....	26
2.7.1.4 Velocidad de agitación.....	27
2.7.1.5 Densidad de pulpas.....	28
2.8 CIANURACIÓN DE MINERALES DE ORO.....	29
2.8.1 Generalidades.....	29
2.8.2 Cinética de disolución de oro (cianuración).....	29
2.8.3 Efectos de las variables sobre la cianuración.....	31
2.8.3.1 Velocidad de flujo.....	32
2.8.3.2 Efecto de la concentración de cianuro.....	32
2.8.3.3 Influencia del pH.....	34
2.8.3.4 Efecto de la concentración de oxígeno.....	35
2.8.3.5 Efecto de la temperatura en la cianuración.....	37
2.8.3.6 Efecto de la agitación.....	37
2.8.4 LIXIVIACIÓN DIAGNOSTICO DE MINERALES DE ORO.....	37
2.8.4.1 Generalidades.....	37
3. METODOLOGÍA.....	39
4. RESULTADOS.....	42
4.1 resultados del montaje y puesta en marcha del laboratorio.....	42
4.2 CARACTERIZACION MINERALOGICA DE LAS MUESTRAS DEL COMPOSITO DEL EJE .....	48

4.2.1 Conformación Del Composito Del Eje.....	49
4.2.1.1 Composición Mineralogica Del Composito.....	50
4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y METALÚRGICA DEL MINERAL....	51
4.3.1. Resultados ensayo al fuego.....	52
4.3.2 Resultados lixiviación diagnostico.....	54
4.3.3 RESULTADOS CIANURACIÓN CONVENCIONAL.....	56
4.3.3.1 Resultados Cianuración Convencional Frente Don Cesar.....	60
4.3.3.2 Resultados Cianuración Convencional Frente Marquitos.....	62
4.3.3.3 Resultados Cianuración Convencional Mezcla Dos Muestras.....	64
4.4 diseño y montaje de la planta de beneficio.....	66
4.4.1. Diseño de la planta de beneficio mejorada para la mina el eje.....	73
4.5 DISEÑO SISTEMA DE CIANURACIÓN.....	74
4.5.1 equipos para el montaje de la planta de cianuración.....	76
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	77
5.1 Análisis Mineralógico De Las Muestras Recibidas.....	77
5.2 Análisis Lixiviación Diagnostico.....	77
5.2.1 Análisis Resultados Lixiviación Diagnostico.....	78
5.3 Análisis De Resultados Del Proceso De Cianuración.....	78
6. CONCLUSIONES.....	80
7. RECOMENDACIONES.....	82
BIBLIOGRAFIA.....	83

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Sistemas Lixiviantes Para El Oro.....	5
Tabla 2. constantes de equilibrio de algunos complejos que pueden formar para la disolución del oro.....	6
Tabla 3. CLASIFICACION SEGÚN GRADO DE LIXIAVILIDAD.....	14
Tabla 4. Equipos De Concentración Gravimetrica.....	18
Tabla 5. Influencia De La Velocidad De Flujo En La Cianuración.....	33
Tabla 6. Influencia De La Concentración De Cianuro En La Disolución De Oro.....	34
Tabla 7. Influencia De La Concentración De Álcalis.....	35
Tabla 8. Efecto Del Oxigeno En La Cianuración.....	36
Tabla 9. Descripción De La Textura Y Estructura De Las Muestras.....	49
Tabla 10. Resultados Ensayo Al Fuego.....	53
Tabla 11. Resultados Lixiviación Diagnostico.....	54
Tabla 12. Resultados Sedimentación Frente Don Cesar.....	57
Tabla 13. Resultados Sedimentación Frente Marquitos.....	58
Tabla 14. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías.....	60
Tabla 15. Porcentaje De Extracción De Oro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías (Frente Don Cesar).....	61
Tabla 16. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías.....	62
Tabla 17. Porcentaje De Extracción De Oro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías (Frente Marquitos).....	63
Tabla 18. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías; Frente Don Cesar- Marquitos En Porciones 70:30 Respectivamente.....	64

Tabla 19. Porcentaje de extracción de oro vs. Tiempo. Diferentes granulometrías frente don cesar- marquitos en porciones 70:30 respectivamente..... ..65

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso De Lixiviación.....	23
Figura 2. Concepto de punto conocido como límite económico.....	25
Figura 3. Lixiviación En Función De La Concentración De Reactivos.....	26
Figura 4. Efecto De La Temperatura Sobre La Difusión Y La Reacción Química.....	27
Figura 5. Efecto De La Agitación En El Grado De Lixiviación.....	28
Figura 6. Disolución Electroquímica Del Oro En Soluciones.....	31
Figura 7. Lixiviación Diagnostico.....	38
Figura 8. Instructivo de la primera etapa del proyecto.....	43
Figura 9. Instructivo segunda etapa del proyecto.....	44
Figura 10. Instructivo de la etapa 3,4 y 5.....	45
Figura 11. barriles utilizados para molienda.....	52
Figura 12. Resultados Lixiviación Diagnostico Frente Don Cesar.....	55
Figura 13. Resultados Lixiviación Diagnostico Frente Marquitos.....	56
Figura 14. Resultados Sedimentación Frente Don Cesar.....	58
Figura 15. Resultados Sedimentación Frente Marquitos.....	59
Figura 16. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías.....	60
Figura 17. Porcentaje De Extracción De Oro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías (Frente Don Cesar).....	61
Figura 18. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías.....	62
Figura 19. Porcentaje De Extracción De Oro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías (Frente Marquitos).....	63
Figura 20. Consumo de cianuro vs. Tiempo. Diferentes granulometrías; frente don cesar- marquitos en porciones 70:30 respectivamente.....	64

Figura 21. Porcentaje de extracción de oro vs. Tiempo. Diferentes granulometrías frente don cesar- marquitos en porciones 70:30 respectivamente.....	65
Figura 22. Montaje de la planta de beneficio.....	67
Figura 23. Zona de descargue de material capacidad 35 ton mineral fresco.....	68
Figura 24. Tolva de cargue de mineral a la planta. Capacidad 16 ton.....	69
Figura 25. Tolva y trituradora primaria.....	70
Figura 26. Trituradora secundaria.....	70
Figura 27. Molino de bolas.....	71
Figura 28. Jigs panamericam.....	71
Figura 29. Mesa Concentradora Tipo Wifley.....	72
Figura 30. Planta de beneficio con su sistema de dosificación de agua.....	72
Figura 31. Diagrama de la planta de beneficio mejorada para la mina el eje.....	73
Figura 32. Diseño Planta De Cianuración.....	74
Figura 33. Planta merril crowe.....	75

## RESUMEN

**TITULO: MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRATAMIENTO DE MINERALES AUROARGENTÍFEROS DE LA ZONA MINERA DE SAN MARTIN DE LOBA (SUR DE BOLIVAR, MINA EL EJE)**

**AUTOR:**

Henry Mauricio Guerrero Gutiérrez

**PALABRAS CLAVES:** lixiviación diagnostico, planta merrill crowe, planta de beneficio, mineral auroargentifero.

**DESCRIPCION:**

Muestras de mineral de oro de 15,7 gramos por tonelada fueron sometidas a varias pruebas con el fin de caracterizar y encontrar el tipo de mineral presente. Se aplicaron pruebas de caracterización mineralógica del mineral, ensayos de sedimentación, pruebas de lixiviación diagnostico y cianuración convencional; para el posterior diseño del proceso de beneficio y extracción de los valores de oro y plata.

Mediante los resultados se comprobó que la granulometría ideal para el proceso de cianuración en tanque de agitación y precipitación de oro por cinc en polvo es 10% mallas Tyler con un tiempo de proceso de 16 horas, para evitar el atrapamiento de los minerales preciosos debido a la presencia de otros minerales arcillosos.

Así mismo el diseño de la planta de beneficio y la planta de cianuración fueron hechos alas necesidades del la mena y restringiéndose por su producción; teniendo en cuenta las normas de seguridad correspondientes.

Conforme a esto se hizo el montaje del equipo de la planta, para empezar la producción y analizar los posibles errores de la misma, con una producción inicial de 25 ton día pero dejando espacio para ampliar el proceso a 50 ton día, construyendo la planta de cianuración, analizando todos su parámetros.

© Trabajo de Grado

Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Director del Proyecto Ing. Jesús Salvador Castillo Moreno

## ABSTRACT

**TITLE: IMPROVING THE PROCESS OF PROFIT AND TREATMENT OF MINERAL AUROARGENTIFEROUS OF MINING IN THE AREA OF SAN MARTIN LOBA (Mine El Eje, southern Bolivar)**

**AUTHOR:** Henry Mauricio Guerrero Gutiérrez

**KEY WORDS:** lixiviation diagnoses, it plants merrill crowe, it plants of benefit, mineral auroargentifero.

A sample of 15.7 grams per ton of fresh mineral was subjected to several tests for the purpose of characterizing and determining the type of mineral present. Tests of mineralogical characterization, sedimentation, lixiviation, along with conventional cyanuration were applied in order to determine the optimum process flow chart for the extraction and beneficiation of the gold and silver values.

The results of the foregoing tests, indicate that the ideal mesh for cyanuration by tank agitation, using powdered zinc is 10% Tyler mesh with a 16 hour agitation time, to avoid the trapping of precious minerals due to the presence clay.

The beneficiation plant and the cyanuration plant were designed for the metallurgical behavior of the ore found in the mine, as well as norms of security; however, mine production was not taken into account.

According to this the assembly of the team of the plant was made, to begin the production and to analyze the possible errors of the same one, with an initial production of 25 rhyme day but leaving space to enlarge the process to 50 rhyme day, building the cyanuración plant, analyzing all its parameters.

© Degree Work

Physical-Chemical Engineering Faculty, Metalurgica Engineering School, Proyect Director Eng. Jesus Salvador Castillo

## INTRODUCCIÓN

La mina a la cual se le va aplicar el diseño de mejoramiento del circuito de beneficio se denomina mina “el eje” y está ubicada en jurisdicción del municipio de San Martín De Loba al extremo sur del departamento de Bolívar en la vereda Guacharaco. Esta mina lleva 25 años de estar abierta trabajando de manera artesanal y desaprovechando la mayoría de los valores de la misma, además de causar un impacto ambiental negativo.

Para esto en este trabajo, en la modalidad de práctica empresarial se desarrollo para proponer un proceso de beneficio y tratamiento, que de acuerdo con las características del mineral, mejore la eficiencia de recuperación y disminuya los niveles de contaminación ambiental causado por el vertimiento de arenas contaminadas con cianuro y mercurio causando gran daño ala comunidad aledaña, por lo que se necesita crear conciencia al minero artesanal para que este controle estos factores.

A pesar de que han aparecido nuevas técnicas de lixiviación para minerales preciosos, los procesos de cianuración continúan siendo utilizados. Dependiendo de las características del yacimiento y los minerales que acompañen al oro se van a definir los parámetros a seguir para el diseño de la planta.

En la zona donde se hará el montaje el oro se encuentra en estado nativo en un gran porcentaje y asociado con sulfuros y telurios. Esta planta para beneficio y cianuración de metales preciosos se tendrá en la química de los mecanismos de extracción y factores que controlan la disolución del oro en soluciones alcalinas de cianuro, para el control de esto se montara además un laboratorio para ensayos donde se podrá simular los procesos y optimizarlos en la etapa de diseño teniendo en cuenta siempre efectividad y economía

## 1. OBJETIVOS

### **OBJETIVO GENERAL:**

Proponer un proceso de beneficio y tratamiento que mejore la recuperación de oro y plata en los minerales auroargentíferos de la mina el eje y disminuya los niveles de contaminación ambiental.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- ✓ Caracterizar el tipo de mineral a tratar para poder escoger un mejor proceso de beneficio.
  
- ✓ Definir los tipos tecnológicos de la mena de acuerdo a las características del mineral para su tratamiento.
  
- ✓ Aumentar la recuperación de oro y plata una vez puesto en marcha el montaje.
  
- ✓ Realizar ensayos de lixiviación diagnóstico, reducción de tamaño, cianuración convencional, para caracterizar metalúrgicamente el mineral.

## 2. MARCO TEÓRICO.

Para estudiar el beneficio de minerales de oro primero se debe conocer las características y generalidades del oro y sus minerales asociados.

### 2.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL ORO:

Las principales propiedades químicas y físicas del oro son:

- ✓ Cristalización en el sistema cúbico centrado en las caras (FCC). Sin embargo los cristales de oro son raros por que este generalmente se encuentra como planos irregulares, láminas o aglomerados<sup>1</sup>.
- ✓ El oro se diferencia de otros minerales que presentan el mismo color como la pirita y la calcopirita por su ductilidad<sup>2</sup>.
- ✓ Es insoluble en ácido excepto el agua regia.
- ✓ En medio alcalino los cianuros de potasio, sodio y calcio disuelven el oro formando complejos de oro.
- ✓ También el oro es soluble en soluciones de tiocianato, tioúrea, tiosulfatos y aquellas soluciones que contienen cloro o bromo libre.
- ✓ El oro nativo es recuperado en contacto con mercurio líquido en forma de amalgama.

## 2.2 MINERALOGÍA DEL ORO:

Los minerales de oro puede estar asociado con otros metales como Ag, Cu, As, Sb, Bi, Fe, Pb y Zn. estos minerales de oro se presentan la mayoría de las veces en dos tipos de depósitos: placeres o aluviones y veneros de fisuras mineralizadas o filones. Y han sido clasificados de acuerdo a los ambientes geológicos en que se originaron y a su facilidad de extracción.

Los siguientes son los ambientes geológicos que Henley<sup>1</sup>, agrupo en 7 categorías:

- ✓ Vetas de oro y cuarzo
- ✓ Depósitos epitermales
- ✓ Placeres jóvenes
- ✓ Placeres fósiles
- ✓ Depósitos con oro diseminado
- ✓ Oro en menas de metales no ferrosos o como subproducto
- ✓ Oro en agua de mar

Quiston y Shoemaker, propusieron la clasificación según la extracción del oro:

- ✓ Menas de oro nativo
- ✓ Oro asociado a sulfuros
- ✓ Teluros de oro

- ✓ Oro en otros minerales ( arsénico y/o Antimonio)

## 2.3 REACTIVOS LIXIVIANTES PARA MINERALES DE ORO:

Se puede apreciar en la tabla 1 una comparación entre varios sistemas lixiviantes, en función del pH y la concentración mínima de reactivo (estos son resultados experimentales para un mineral de oro)<sup>2</sup>.

**Tabla 1. Sistemas Lixiviantes Para El Oro**

Sistema de lixiviación	Dosis de reactivo en ppm	pH
Sistema del cianuro	Cianuro 500ppm	11.0
Sistema de tiosulfato	Tiosulfato de amonio 15000ppm	9.1
Sistema de tiourea	Tiourea 1250 a2900ppm	1.6
Sistema del bromo	Bromo 1000ppm Bromuro de sodio 10000ppm	2.4
Sistema de hipoclorito	Hipoclorito de sodio 1000ppm Cloruro de sodio 100000ppm	5.9

Fuente: DOMIC M E. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones, editorial Andros impresiones Ltda. Chile 2001

De acuerdo con esto al lixiviar un mismo mineral el sistema que requiere menor cantidad de reactivo es el de cianuro.

### 2.3.1 Estabilidad De Complejos De Oro:

El oro tiene la particularidad de formar diferentes tipos de complejos según el ligando y el agente oxidante que intervengan en la disolución:

- ✓ Complejos aniónicos:  $AuX_2^-$
- ✓ Complejos catódicos:  $AuL_2^+$
- ✓ Complejos neutros:  $AuXL$

**Tabla 2. Constantes de equilibrio de algunos complejos que pueden formar para la disolución del oro.**

Ligante		K
Cianuro	$CN^-$	$2 \times 10^{38}$
Tiocianato	$SCN^-$	$1.3 \times 10^{17}$
Tiosulfato	$S_2O_3^{-2}$	$5 \times 10^{28}$
Cloro	$Cl^-$	$1 \times 10^9$
Bromuro	$Br^-$	$1 \times 10^{12}$
Tiourea	$CS(NH_2)^{-2}$	$2 \times 10^{23}$

Fuente: DOMIC M E. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones, editorial Andros impresiones Ltda. Chile 2001

Como se puede apreciar el complejo más estable es el formado con cianuro y esta es la reacción:



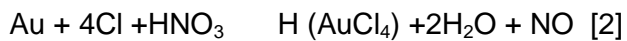
### 2.3.2 Reacciones De Disolución Del Oro:

Los diferentes sistemas de disolución de oro mencionados anteriormente se plasman aquí:

### 2.3.2.1 Agua Regia:

El agua regia es una solución de ácido clorhídrico y ácido nítrico en proporciones 3:1, donde el ácido nítrico actúa como agente oxidante y el clorhídrico como agente ligante del oro y la plata.

La disolución del oro y la plata con esta solución es usada en química analítica para la determinación volumétrica o gravimétrica del oro soluble.



### 2.3.2.2 Soluciones De Cianuro:

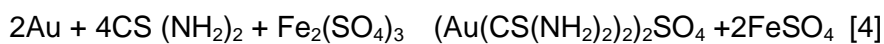
Para la disolución del oro con cianuro se usan soluciones acuosas de NaCN,  $\text{Ca}(\text{CN})_2$  y KCN en presencia de oxígeno sin embargo, industrialmente se prefiere el cianuro de sodio, por su mayor contenido de  $\text{CN}^-$  activo por unidad de peso.

Esta reacción fue propuesta por Elsner<sup>3</sup>:



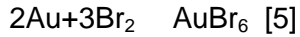
### 2.3.2.3 Soluciones De Tiourea:

La tiourea se utiliza como reactivo de lixiviación en medio ácido y esta es la reacción:



#### **2.3.2.4 Halógenos:**

La reacción del oro con los halógenos formando haluros solubles mediante la siguiente reacción:



#### **2.3.2.5 Cloruración:**

La cloruración fue utilizada en la minería antes de la introducción del proceso cianuración y fue desplazada por las siguientes razones: 1) Es una lixiviación altamente corrosiva y por ende necesita de la construcción de equipos con materiales especiales resistentes a la corrosión, 2) Requiere del uso de cloro gaseoso, cuyo costo es más elevado que el del aire utilizado en la cianuración cuya reacción es:

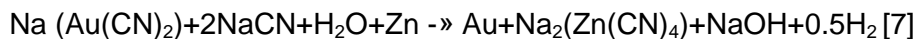


### **2.3.3 Recuperación Del Oro:**

Estas son las reacciones que se presentan durante los procesos de recuperación de oro utilizados industrialmente:

#### **2.3.3.1 Cementación Con Zinc:**

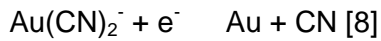
La cementación de oro con zinc es usada frecuentemente en la recuperación de oro desde soluciones cianuradas:



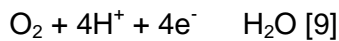
### 2.3.3.2 Electro deposición:

La electro deposición del oro se aplica industrialmente a soluciones provenientes del proceso de adsorción-desorción, es decir a soluciones con alta concentraciones de iones  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ . Las reacciones que ocurren en la electro deposición son de naturaleza electroquímica.

#### Reacción catódica:



#### Reacción anódica:



## 2.4 CARACTERIZACIÓN DE MINERALES DE ORO:

En la caracterización de minerales se obtienen parámetros que orientan a la selección apropiada del ciclo de beneficio y tratamiento del mineral. Esta caracterización de minerales se puede dividir en cuatro categorías:

- **Caracterización Mineralógica:** Análisis macroscópico y análisis microscópico.
- **Caracterización Geoquímica:** Ensayo al fuego convencional, ensayo al fuego-absorción atómica, determinación de oro y plata por vía húmeda.

- **Caracterización Fisicoquímica:** Densidad, tenores químicos, retención de líquidos, viscosidad de pulpas, peso específico, acidez, dureza y velocidad de sedimentación.
- **Caracterización Metalúrgica:** índice de trabajo, análisis granulométrico, distribución de oro, cianuración en botella y determinación cualitativa de sales solubles.

#### **2.4.1 Caracterización Mineralógica:**

En la caracterización mineralógica se realiza un análisis macroscópico de las muestras, identificando la estructura, textura y composición. Posteriormente se desarrolla el análisis microscópico sobre secciones delgadas y pulidas, que permite identificar el tamaño y la ocurrencia del oro en el mineral, además de los minerales que componen la mena y la ganga.

A partir de la información suministrada por la caracterización mineralógica, se los siguientes grupos de datos<sup>2</sup>:

##### **2.4.1.1 Grupo de datos Composicionales Y Mineralógicos:**

Minerales de la mena, minerales metálicos sin valor, minerales de la ganga, minerales oxidados y minerales inconvenientes o perjudiciales.

##### **2.4.1.2 Grupo de datos Geométricos:**

A través de ellos se busca definir la forma mineral de interés económico, el tamaño de grano, las relaciones de Inter. Crecimiento de los minerales de la mena y la ganga.

### **2.4.1.3 Grupo de datos Cuantitativos:**

Reporta el valor cuantitativo del tamaño grano del mineral valioso.

### **2.4.2 Caracterización Geoquímica:**

El principal objetivo de esta caracterización es el cuantificar los minerales útiles y nocivos, para evaluar la viabilidad de su tratamiento y el grado de dificultad de su extracción.

En la caracterización geoquímica se realizan pruebas como:

#### **2.4.2.1 Ensayo Al Fuego Convencional:**

Es el método tradicional empleado la determinación de oro en menas, concentrados, metales y otros materiales sólidos<sup>4</sup>.

##### **2.4.2.1.1 Los fundamentos del ensayo<sup>5</sup>:**

- ✓ El alto grado de solubilidad del oro y la plata, en el plomo metálico fundido y su casi completa insolubilidad en escorias de adecuadas composiciones, hacen fácil su atrapamiento.
- ✓ La marcada diferencia de gravedad específica entre los dos líquidos, plomo y escoria, permite la separación del régulo de la escoria.
- ✓ La marcada diferencia de gravedad específica entre los dos líquidos, plomo y escoria, permite la separación del régulo de la escoria.

- ✓ El plomo puede ser prácticamente removido de los metales preciosos, por una cuidadosa fusión oxidante, llamada copelación.
- ✓ La solubilidad completa de plata y la insolubilidad del oro en ácido nítrico, permiten la determinación del contenido de oro.

**Las etapas que comprenden este ensayo son:**

#### **2.4.2.1.2 Tostación:**

Consiste en someter los sulfuros a la acción del calor en presencia de oxígeno hasta llegar a una temperatura a la cual según el diagrama de Ellingam se transformen en óxidos.

#### **2.4.2.1.3 Fusión y Lingoteado:**

El éxito de esta etapa depende de la formación de una escoria adecuada, y esta a su vez es función de la composición de la carga. La carga está elaborada para una mena libre de sulfuros y está compuesta por: carbonato de sodio, litargirio, bórax, sílice, harina y nitrato de potasio. El resultado de esta etapa es una masa metálica de plomo-oro-plata, conocida como régulo.

#### **2.4.2.1.4 Copelación:**

Consiste en una fusión en donde el plomo y otros elementos se oxidan y volatilizan a temperaturas adecuadas, con el fin de obtener un botón de oro y de plata, conocido como doré.

#### **2.4.2.1.5 Ataque químico:**

El doré es atacado con ácido nítrico, el cual disuelve la plata y no ataca al oro. Finalmente se pesa el oro y se calculan los tenores de oro y plata.

#### **2.4.3. Caracterización Metalúrgica:**

Determina algunas características del mineral que definen su comportamiento metalúrgico en ciertas etapas del proceso.

##### **2.4.3.1 Índice de trabajo (Work Index):**

El término índice de trabajo descrito teoría de Bond, es igual a los Kw-h por tonelada de alimento, que se para romper un material desde un tamaño infinito, a un tamaño promedio de 100 micrones.

##### **2.4.3.2 Análisis granulométrico:**

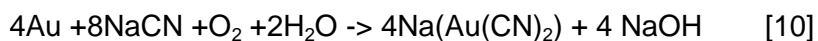
Es de gran importancia para la determinación de la calidad de molienda y para establecer el grado de liberación de los minerales útiles de la ganga en varios tamaños de partícula. Son métodos exactos, muy seguros y se pueden hacer a cualquier tipo de escala.

##### **2.4.3.3 Distribución de Oro:**

Este ensayo permite determinar las cantidades de oro distribuidas en las diferentes granulometrías para un mineral molido a D80 60 mallas Ty, esto con el fin de conocer en qué granulometría se encuentra la mayor cantidad del oro en el mineral, lo que indica posiblemente el grado de molienda necesario para el proceso.

#### 2.4.3.4 Cianuración en botella:

La disolución de oro en soluciones de cianuro en presencia de oxígeno es la principal reacción de extracción de oro a partir de sus menas:



**TABLA 3. Clasificación según grado de lixiviabilidad**

Porcentaje de oro diluido	Grado de lixiviabilidad
<65%	Difícilmente lixiviable
65-85%	Medianamente lixiviable
>85%	Fácilmente lixiviable

Fuente: ALBERT, T. GENERAL online- heap leach network. Kappes, cassiday and associates. USA.

#### 2.5 BENEFICIO Y TRATAMIENTO DE MINERALES DE ORO:

Existen muchos procesos que permiten la obtención del oro y de la plata en estado metálico desde sus minerales. La selección de los procesos de beneficio y tratamiento adecuados, dependerá de las características del mineral y de su comportamiento frente a estos.

### 2.5.1 Beneficio:

Consiste en la conminución o reducción de tamaño del mineral para su posterior tratamiento. Se aplica para el procesamiento de oro de filón. La conminución se realiza con el fin de:

- ✓ Producir partículas de un tamaño adecuado, tal que permita el acceso de las soluciones cianuradas.
- ✓ Liberar el oro contenido en la matriz de la ganga.
- ✓ Incrementar el área de superficie disponible para la cianuración, obteniendo así una rápida cinética de extracción.

El proceso de conminución comprende dos etapas que se desarrollan secuencialmente: la trituración y la molienda. Existen tres tipos básicos de circuitos de conminución<sup>1</sup>:

- ✓ Circuito cerrado convencional en tres etapas: Trituración, molienda en molinos de barras y molienda en molino de bolas.
- ✓ Trituración primaria y molienda autógena.
- ✓ Trituración primaria, trituración secundaria y por último molienda fina en molino de bolas.

Para elegir el circuito apropiado de conminución, se deben considerar algunos factores como son: dureza, friabilidad del depósito, distribución granulométrica del oro, granulometría de reducción, y las consideraciones de costos.

### **2.5.1.1 Trituración:**

El término trituración se aplica a reducciones secuenciales de tamaño hasta alrededor de 25 mm, las reducciones a menores tamaños se consideran como molienda<sup>6</sup>.

Esta operación se puede ejecutar en varias etapas, y el número de ellas va a depender de las características propias del mineral, tal como la tenacidad, la dureza, y el tamaño de reducción final<sup>7</sup>.

Para efectuar la trituración, se utilizan diferentes tipos de equipos como son las trituradoras de mandíbulas, de cono, de rodillos entre otras. La diferencia entre ellas es la forma de aplicación de la fuerza para lograr la fractura.

Estos equipos generalmente trabajan a compresión y con mineral relativamente seco.

### **2.5.1.2 Molienda:**

Una vez el mineral ha sido triturado, se pasa a la etapa de molienda, su objetivo es reducir el mineral hasta un tamaño conveniente, ya sea para la separación gravimétrica del oro grueso o en el caso de la lixiviación, para lograr la liberación de las partículas de oro y de esta manera maximizar la velocidad de reacción y eficiencia de la cianuración<sup>1</sup>.

En la molienda se utilizan principalmente molinos giratorios. Los mecanismos de fractura son principalmente por impacto y abrasión. Los molinos utilizados en la industria minera se pueden clasificar según los cuerpos moledores en: molinos de barras, molinos de bolas, molinos autógenos y molinos semiautógenos.

En los circuitos convencionales se disponen normalmente molinos de barras seguidos de molinos de bolas. Los molinos de bolas pueden operar en circuito cerrado con la ayuda de los clasificadores, obteniendo el tamaño deseado de mineral.

Los molinos para molienda autógena, son equipos que no presentan cuerpos moledores que ayuden a la reducción de tamaño del mineral, por esta razón, solo se puede implementar en minerales duros, frágiles y que no presenten una alta humedad.

### **2.5.1.3 Concentración:**

La concentración es una operación que tiene como fin, incrementar el tenor del mineral, mediante la separación de dos o más especies mineralógicas, aprovechando la diferencia de las propiedades físicas de los minerales, tales como: densidad (concentración gravimétrica), propiedades magnéticas (concentración magnética), conductividad eléctrica (concentración eléctrica), etc.<sup>8</sup>

En la minería del oro, se utilizan principalmente las técnicas de concentración gravimétrica.

### **2.5.1.4 Concentración gravimétrica:**

La concentración gravimétrica puede ser definida como un proceso de separación de partículas que presentan tamaños, formas y pesos específicos diferentes, mediante el uso de la fuerza de gravedad, las fuerzas de arrastre o las fuerzas centrifugas.

El oro contenido en un cuerpo mineralizado tiene una gravedad específica de 19,3 y la roca madre típica (cuarzo) tiene una gravedad específica de alrededor de 2.9. Debido a esta diferencia, se podrá afirmar que la concentración gravimétrica se aplica a minerales de oro.

Todos los equipos de concentración gravimétrica crean un movimiento entre las partículas de mineral valioso y las partículas de la roca madre, separando las pesadas de las livianas<sup>8</sup>.

La concentración gravimétrica de los minerales de oro, previa a la cianuración, disminuye la cantidad de ganga que entra a esta etapa, reduciendo el consumo de cianuro y minimizando los costos de la etapa de neutralización de las colas.

Existen varios equipos para aplicar la concentración gravimétrica como son: mesas Wilfley, conos Reicherí, espirales, jigs y concentradores de nueva generación como lo son el Knelson y Falcan. La Tabla 4 muestra una descripción de algunos de estos.

La concentración gravimétrica no es aplicable a todo tipo de mineral, ya que cuando el oro presenta tamaños muy finos, se dificulta su concentración, ocasionando pérdidas en las soluciones de descarte.

Debido a la presencia de partículas mixtas y/o los mecanismos de separación, es difícil concentrar eficazmente mediante una sola etapa, por ello generalmente se emplean varias etapas de concentración.

**Tabla 4. Equipos De Concentración Gravimétrica:**

Equipos	Mecanismo de concentración
Mesas Wilfley	Consiste en una cubierta ligeramente inclinada, que tiene una caja de alimentación sobre la cual se vierte la pulpa y la distribuye sobre la superficie. La mesa vibra longitudinalmente buscando separar las partículas por efecto de la fuerza del movimiento de la mesa y la fuerza de arrastre del fluido. La alimentación tiene aproximadamente 25% en peso de sólidos.

Espirales	Compuesto de un conducto helicoidal de sección transversal semicircular modificada. La pulpa de alimentación debe tener una densidad entre 15 y 45%.de sólidos en peso. Los sólidos deben estar en un rango entre 75 micrones y 1-3 mm.
Concentra dores de última generación: Knelson	Consiste en un recipiente con un cono interno con canales. La pulpa ingresa por medio de un tubo axial. Las partículas livianas salen por un rebalse, mientras que las pesadas son lanzadas hacia los rifles del cono interno. Permite concentrar oro con un amplio rango de granulometrías.

15 POLING, G. Seminario taller sobre tecnologías limpias en la recuperación del oro. Editor Rescan Environmental Services Ltd. Colombia, 1999

*Fuentes*'. CETEM. Tratamiento de mínenos. Editores Adao Benvindo da Luz, Mario Valente Possa, Salvador Luiz de Almeida. 2ª edición. 1998; <http://www.freivokhtech.com/knelson/knelson-top-s.asp>; POLING, G. Seminario taller sobre tecnologías limpias en la recuperación del oro. Editor Rescan Environmental Services Ltd. Colombia 1999.

## 2.6 PRE-TRATAMIENTOS:

Algunas menas de oro según su composición mineralógica, pueden presentar comportamiento refractario a la cianuración, produciendo bajas recuperaciones de oro. Dicha refractariedad puede ser de tipo químico y físico:

### **2.6.1 Refractoriedad química:**

Se resume a cuatro condiciones<sup>1</sup>:

- ✓ Teluros de oro insolubles.
- ✓ Componentes cianicidas.
- ✓ Consumidores de oxígeno.
- ✓ Precipitantes del oro.

### **2.6.2 Refractoriedad física.**

Se puede presentar en minerales que tengan las siguientes condiciones:

- ✓ Oro atrapado o encapsulado: En carbón, pirita, arsenopirita o sílice. Aleaciones de oro con antimonio o plomo.
- ✓ oro cubierto con películas de: Óxidos de hierro, cloruros de plata, compuestos de antimonio, manganeso y plomo.
- ✓ Materiales adsorbentes del oro disuelto en la solución preñada: Material carbonáceo y arcillas.

Para mejorar la recuperación de oro de estas menas se puede implementar un pre-tratamiento antes de la cianuración.

La mayoría de tratamientos para oro refractario son costosos, y frecuentemente su aplicación solo es rentable cuando se tratan grandes volúmenes de minerales de alto tenor.

Entre los pre-tratamientos se tienen:

### **2.6.2.1 Tostación:**

La tostación se realiza con el fin de liberar las partículas de oro encapsuladas o adheridas a sulfuras, arseniuros ó carbones, eliminar parte del azufre, arsénico, antimonio y oxidar algunos teluros.

La tostación usa altas temperaturas en presencia de oxígeno, oxidando los sulfuras y el material carbonáceo presente en el cuerpo mineralizado.

El resultado es una calcina blanda y porosa que no encapsula ni recubre las partículas de oro.

La temperatura es un factor muy importante en este proceso, y debe ser controlada para obtener una calcina de óptima calidad.

Generalmente es menor a 650 °C, para evitar la "tostación flash", debida a un pequeño sobrecalentamiento que ocasiona la sinterización de partículas sólidas.

En algunas ocasiones, se recomienda hacer una pre-aireación de la pulpa en presencia de cal antes de la cianuración, con el fin de eliminar álcalis y sustancias consumidoras de oxígeno. También es importante lavar las calcinas y posteriormente molerlas para liberar el oro y plata.

La tostación no es aceptada ambientalmente por la generación de grandes cantidades de anhídrido sulfuroso a la atmósfera. Sin embargo, actualmente se emplean sistemas complejos para la limpieza de este gas, obteniendo como subproducto ácido sulfúrico.

## 2.7 LIXIVIACIÓN:

La lixiviación se define como una etapa en la que se produce una disolución selectiva de los metales presentes en las especies mineralógicas, usando una solución disolvente acuosa y un agente oxidante.

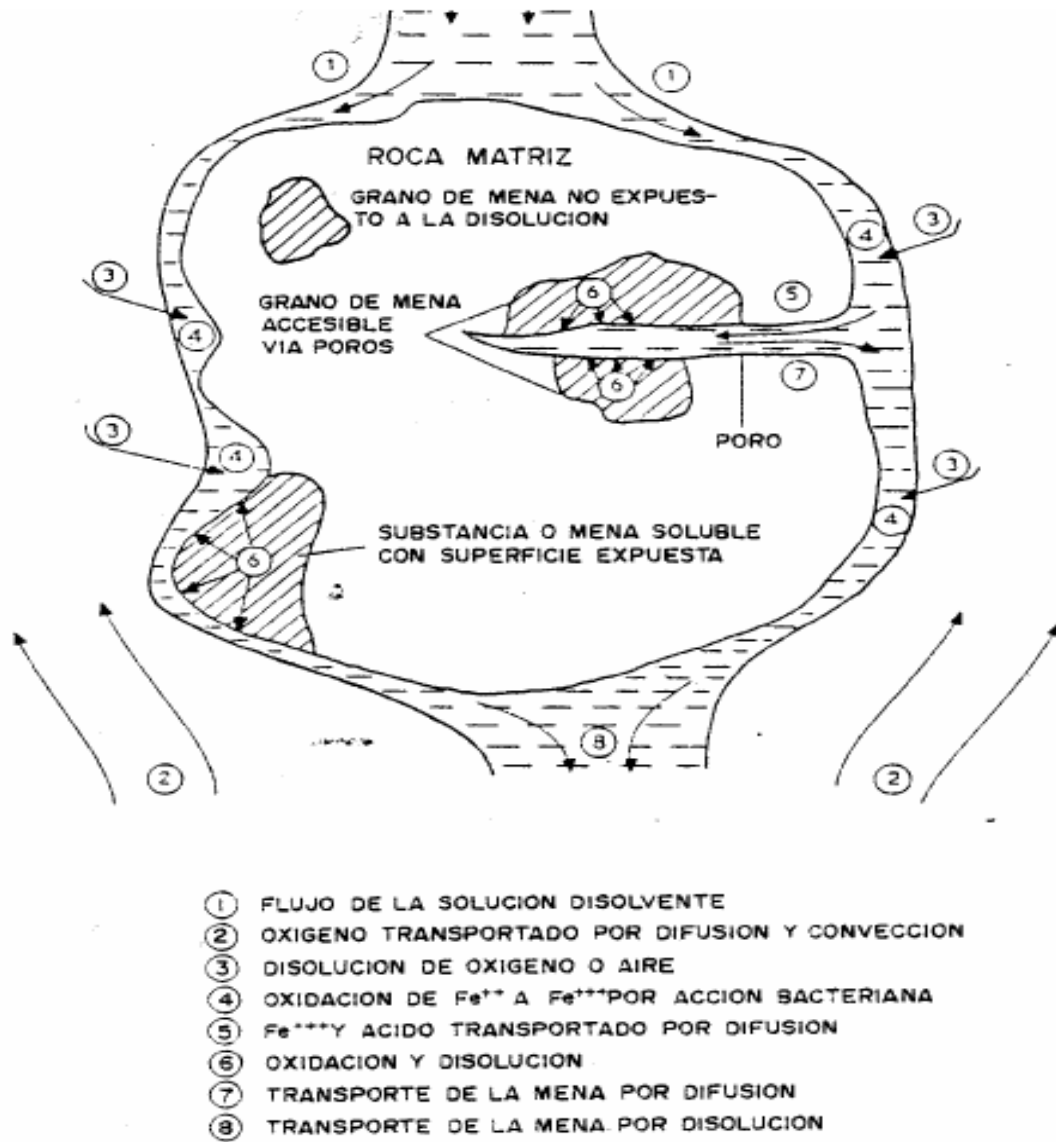
Para minerales auroargentíferos, se utilizan los siguientes sistemas de lixiviación, siendo la cianuración el de mayor aplicación industrial, es muy importante que en este tipo de procesos se produzca un rechazo o poco consumo de los reactivos por los minerales o compuestos no útiles, considerados ganga; de forma que se faciliten los procesos de posterior separación, obteniéndose soluciones de aceptable pureza en cuanto al mineral deseado. Este concepto puede ser incorporado al proceso, conociéndose las constantes de solubilidad de la ganga y el metal útil en términos de las variables de mayor importancia como presión, temperatura y concentración.

Los procesos de lixiviación involucran diferentes tipos de reacciones de disolución, uno de los tipos de reacciones de mayor importancia, corresponde a las reacciones de disolución con oxidación o reducción debido a que incluye reacciones de cianuración de minerales auríferos.

La secuencia de pasos en el proceso de lixiviación se ilustra en la figura 1 y se puede resumir así:

1. los reactivos difunden a la superficie del mineral (agentes oxidantes, reductores, ligandos complejantes, iones hidroxilo, o hidrogeno)
2. adsorción de reactivos sobre la superficie del mineral.
3. reacción química sobre la superficie del mineral.
4. desorción de los productos de reacción de la superficie del mineral.

5. difusión de los productos de reacción hacia la solución.



Fuente: desarrollo de correlaciones de mineralogía y extracción de oro en minerales auríferos mediante datos de lixiviación diagnóstico, Y. A Peñate zuñiga Bucaramanga2004.

**Figura 1. Proceso De Lixiviación.**

### **2.7.1 Variables del proceso.**

Generalmente en los proceso de lixiviación es de vital importancia obtener la máxima velocidad de disolución selectiva ajustando la variables del proceso y minimizando costos.

Las variables del proceso son:

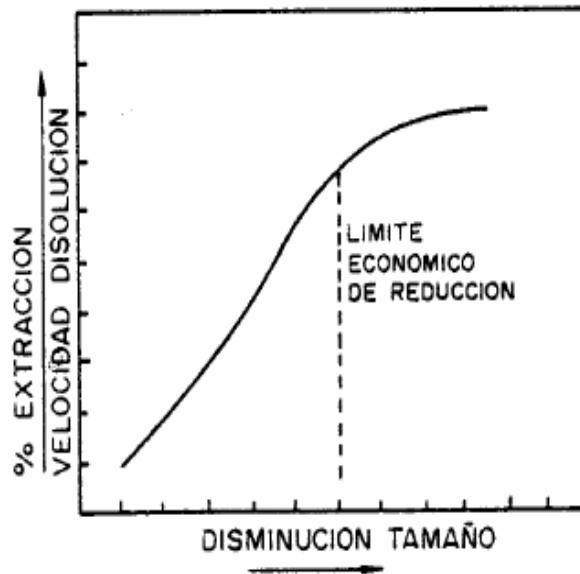
- ✓ Tamaño o Área superficial
- ✓ Las distancia de difusión en función de la agitación.
- ✓ la concentración de reactivos.

A estas variables hay que agregar el potencial del oxido-reducción, temperatura, densidad y viscosidad de pulpa, así como el agua de lavado usada en los circuitos.

#### **2.7.1.1 Tamaño de partícula.**

A diferencia de otras variables del proceso el tamaño de partícula impone las mayores restricciones sobre porcentaje de extracción y el máximo obtenible.

A diferencia de la flotación donde las partículas solo tienen que estar expuestas, en la lixiviación las partículas tienen que estar liberadas completamente, por lo cual entre mas fina sea la reducción de tamaño mayor es la extracción. De ahí el concepto de punto conocido como limite económico de molienda con función en el tamaño de partícula. La cual es mostrada en la **figura 2**.



**Figura 2. Concepto de punto conocido como límite económico**

Fuente: instituto tecnológico geominero de España. Minería química.1991 pg 52

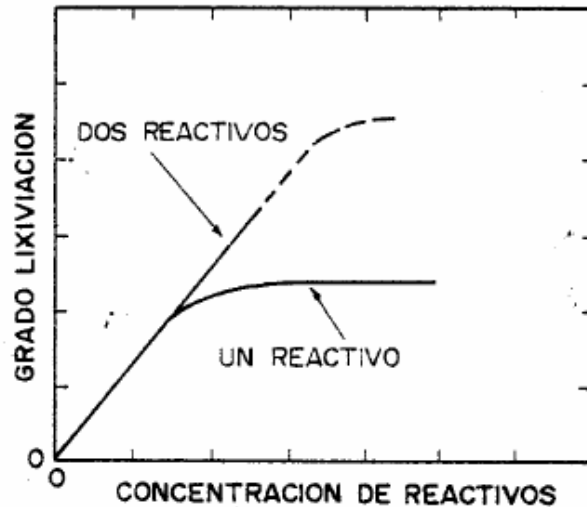
Según el método propuesto por kautzmann y miltzarek<sup>2</sup>, la granulometría Óptima en la cual se obtendrán las mayores disoluciones de oro será aquella que en ensayos de cianuración convencional presenten mayores disoluciones las 48 h.

### 2.7.1.2 Concentración de reactivos:

Es uno de los factores de mayor cuidado durante el proceso de lixiviación aparte de considerarse una de las que tienen vital importancia en el. Sistema; y la forma de encontrar las concentraciones ideales es casi siempre de forma experimental.

En sistemas que involucran más de dos reactivos la máxima velocidad de reacción para una concentración variable de un reactivo, es limitada por la difusión del otro reactivo y esto se observa en la figura 3. En este caso se hace necesario aumentar la concentración de ambos reactivos para obtener un aumento en la velocidad de

disolución. Esto es fundamentalmente importante debido a que involucra a adición de oxígeno a temperatura ambiente.



**Figura 3. Lixiviación En Función De La Concentración De Reactivos.**

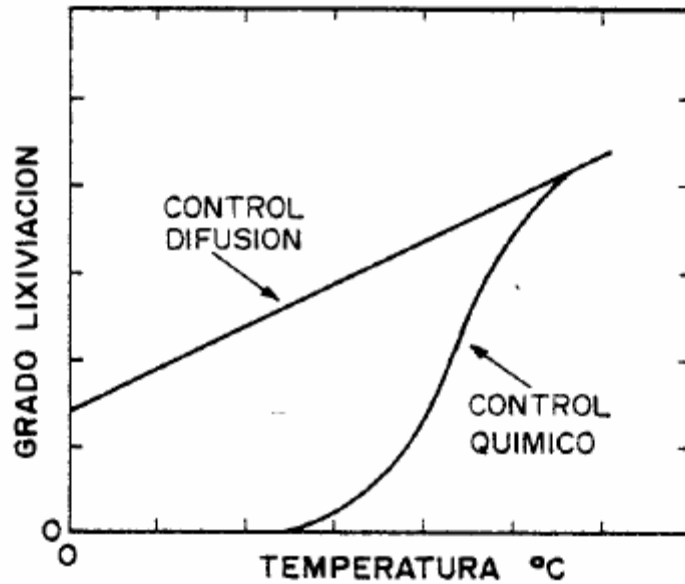
Fuente: society of mining engineers.mineral processing handbook, 1985 pag13-24.

### 2.7.1.3 Temperatura:

Un incremento de la temperatura de lixiviación, suele utilizarse para aumentar la solubilidad de las sustancias o incrementar la velocidad de reacción o minimizar la disolución de la ganga.

Para reacciones controladas por la difusión ósea cuya energía de activación supere 4Kcal/mol; el efecto de aumentar la temperatura sobre un rango determinado, crea un incremento sobre la velocidad de reacción que es mas o menos lineal plasmado en la figura 4.

Para minerales como el oro, cobre, uranio y otros metales base, un incremento en la temperatura de procesamiento tiene muy poca importancia.



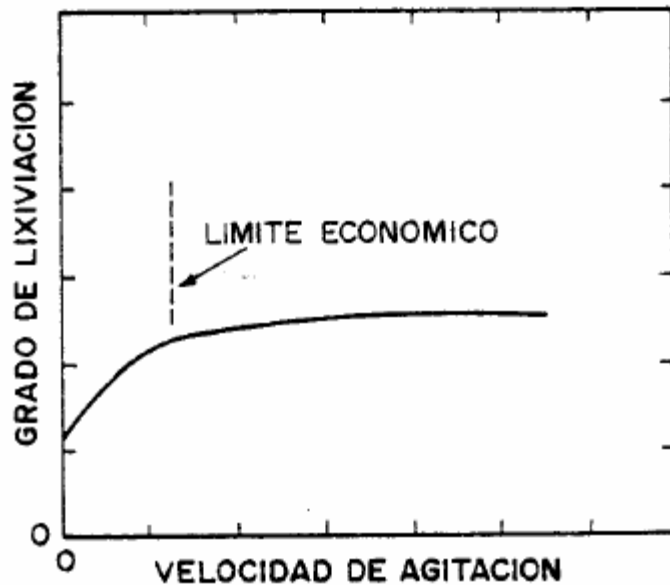
**Figura 4. Efecto de la temperatura sobre la difusión y la reacción química.**

Fuente: :society of mining engineers.mineral processing handbook, 1985 pag 13-24

#### **2.7.1.4 Velocidad de agitación:**

En la figura 5 se ve que para reacciones controladas por difusión, cuando se estudian con disco rotatorio o otros métodos, el efecto de aumentar la velocidad de agitación, se ve reflejado en un incremento de la velocidad de reacción hasta un valor límite debido a la reducción del espesor en la capa límite de difusión.

Un aumento de la energía en un sistema de lixiviación mediante un agitador tiende a incrementar la pendiente de la curva en la primera parte de esta, pero no afecta la parte final de la curva; así el tiempo necesario para obtener una extracción cercana al máximo es casi el mismo que sin incremento de energía.



**Figura 5. Efecto De La Agitación En El Grado De Lixiviación.**

Fuente: society of mining engineers.mineral processing handbook, 1985 pag 13-24.

#### **2.7.1.5 Densidad de pulpas:**

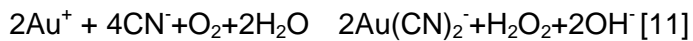
La densidad de pulpas o reacción sólido líquido, cubre un amplio rango en lixiviación con agitación y depende de factores como: método de preparación del alimento, tamaño requerido de partículas, tipo de mineral, requerimientos del proceso, etc.

Para la mayoría de minerales donde el porcentaje disuelto es poco comparado con el porcentaje de alimento, los porcentajes de pulpa durante la lixiviación no son críticos, aunque si influencia el tiempo promedio de residencia en la agitación, en estos casos se utiliza el valor más alto conveniente. En general el factor que mas afecta la densidad de pulpa es la forma de preparación del alimento, aunque el circuito de lavado y el carácter del mineral también pueden tener efecto.

## 2.8 CIANURACIÓN DE MINERALES DE ORO

### 2.8.1 Generalidades:

En la mayoría de minerales de oro, este elemento se encuentra en forma metálica y debe ser oxidado durante el proceso de disolución. Las reacciones que tienen lugar cuando se tiene el oxígeno como oxidante la reacción de lixiviación es:



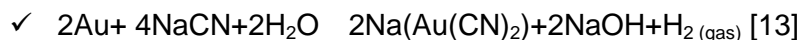
El oxígeno se suministra a través del aire y a la vez sirve para agitar la pulpa, el cianuro se adiciona como cianuro de sodio o de calcio y cal para controlar el pH.

La disolución de oro, puede verse afectada negativamente por cianicidas (minerales de cobre, sulfuros de arsénico y antimonio, sulfuros de otros metales, azufre y minerales arcillosos.), que no solo disminuyen la concentración de cianuro disponible para la lixiviación si no que además para inhibir el proceso.

Durante el proceso de lixiviación, la velocidad de cianuración de oro está controlada por la difusión y puede ser limitada por el transporte de reactivos, oxígeno o cianuro dependiendo de su concentración relativa. La velocidad también puede ser controlada por la velocidad de reacción en la superficie, y esto sucede cuando bajo ciertas condiciones, se forman capas básicas de cianuro airoso y causa pasivación del sistema.

### 2.8.2 Cinética de disolución de oro (cianuración)

Para explicar la cinética de disolución de oro en soluciones acuosas cianuradas, existen 2 ecuaciones clásicas y son:



La primera ecuación es la mejor describe la disolución del oro mediante cianuración, por tener mayor cambio de energía libre. Se demostró que esta reacción sucede hasta cuando todo el cianuro se ha consumido o todo el mineral se ha disuelto.

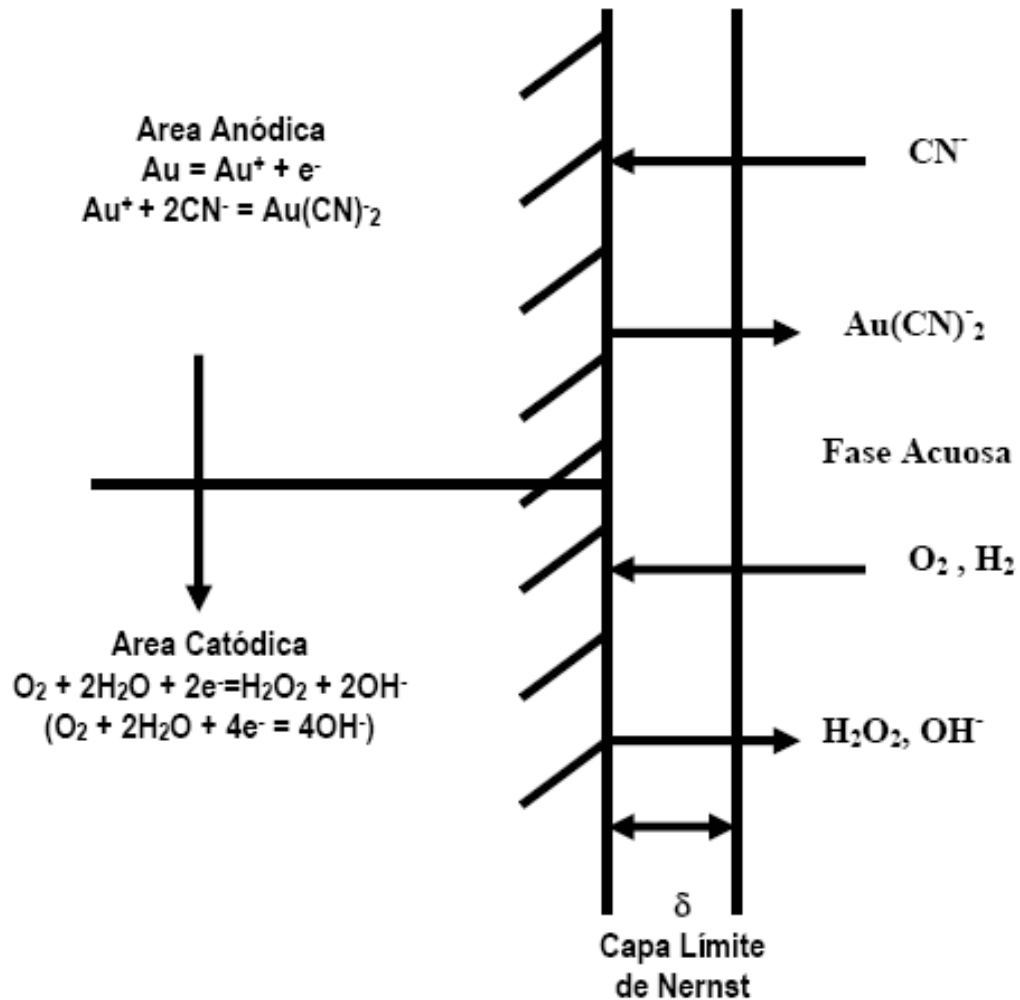
Al pasar el tiempo y de forma muy gradual, se ha establecido que la lixiviación de oro es básicamente un proceso de corrosión electroquímico, y con la velocidad controlada por difusión de cianuro y oxígeno.

La velocidad de disolución, no se puede aumentar significativamente por que el oro es pasivado por el cianuro o por la formación de capas de óxido.

Aparte de la reacción química, la cianuración de oro esta regida por procesos físicos de difusión con varias etapas entre ellas: disolución de cianuro y de oxígeno, transporte de estos reactivos a la superficie del mineral, absorción del cianuro y del oxígeno, la reacción electroquímica, y la formación del complejo cianurazo para que al final ese sea transportado a la superficie.

Este proceso de cianuración obedece a parámetros químicos como la concentración de cianuro y oxígeno, la influencia de agitación, la temperatura y el oxígeno disuelto y además la alcalinidad protege la hidrólisis del cianuro.

En la figura 6 parece una representación esquemática del proceso.



**Figura 6. Disolución electroquímica del oro en soluciones.**

Fuente: DOMIC, M.E. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones, op. Cit. p.6

### 2.8.3 Efectos de las variables sobre la cianuración:

El proceso de lixiviación de minerales a través de un reactivo químico, está influenciado por gran cantidad de variables, que muchas veces dificulta su control. Para tener conocimiento sobre la influencia de estos factores, se recurre a experimentación a condiciones tan idénticas como sea posible al proceso de cianuración de oro, sin embargo muchas veces se presentan desviaciones o comportamientos anormales, muchas veces difíciles de explicar.

Los factores principales que afectan gravemente la cianuración son: velocidad de flujo, concentración de cianuro, alcalinidad, concentración de oxígeno, temperatura, agentes reductores, etc.

#### **2.8.3.1 Velocidad de flujo:**

Este tipo de variable aplica a la cianuración de oro, expresa los resultados de la velocidad de disolución de oro a diferentes concentraciones de cianuro y diferentes velocidades de flujo. La representación gráfica de estos resultados en forma normal y logarítmica se observan en la tabla 5

#### **2.8.3.2 Efecto de la concentración de cianuro:**

El efecto de la concentración de cianuro, se analiza tomando una velocidad constante de 5cm/S y sometiendo las muestras a diferentes concentraciones de cianuro donde se obtienen resultados similares a la tabla 6. Donde según estos resultados, la velocidad de disolución de oro en soluciones de cianuro aumenta hasta un máximo para concentraciones de cianuro de 0.025 manteniéndose prácticamente constante por encima de este valor; esto concuerda con la teoría de la película de difusión que dedujo que por encima de 0.02 se mantenía constante, por esta razón es que en la mayoría de plantas de cianuración utilizan soluciones entre 0.02 y 0.03% de cianuro libre para tratar sus minerales de oro.

Tabla 5. Influencia de la velocidad de flujo en la cianuración.

Velocidad V cm/seg.	Disolución m mg/cm <sup>2</sup> /h	Log V	Log m
<b>I) Concentración NaCN = 0,01%</b>			
0,21	0,52	-0,68	-0,28
0,31	0,48	-0,51	-0,32
0,99	0,62	0,00	-0,21
2,1	0,76	+0,33	-0,12
4,9	0,86	+0,69	-0,07
5,0	1,22	+0,79	+0,09
9,6	1,05	+0,98	+0,02
<b>II) Concentración NaCN = 0,1%</b>			
0,22	0,59	-0,66	-0,23
0,55	0,82	-0,26	-0,09
1,1	0,79	+0,04	-0,12
1,7	1,27	+0,23	+0,10
2,9	1,40	+0,40	+0,15
3,0	1,50	+0,48	+0,18
4,2	1,81	+0,62	+0,26
6,3	2,07	+0,80	+0,32
7,9	2,17	+0,90	+0,34
11,7	2,51	+1,06	+0,40
13,2	2,63	+1,12	+0,42
<b>III) Concentración NaCN = 1%</b>			
0,24	0,62	-0,62	-0,21
0,37	0,72	-0,43	-0,14
1,0	1,0	0,00	0,00
2,0	1,15	+0,30	+0,06
4,9	1,52	+0,69	+0,18
7,9	1,96	+0,90	+0,29

Fuente: desarrollo de correlaciones de mineralogía y extracción de oro en minerales auríferos mediante datos de Lixiviación diagnóstico, yesid Alberto peñate zuñiga, bucaramanga2004.

**Tabla 6. Influencia de la concentración de Cianuro en la disolución de oro.**

Concentración % NaCN	Disolución Mg/cm <sup>2</sup> /h
0.005	0.77
0.01	0.93
0.015	1.11
0.02	1.13
0.026	1.38
0.03	1.38
0.04	1.42
0.05	1.31
0.106	1.41

Fuente: instituto tecnológico geominero de España. Minería química.1991 pg 208

### **2.8.3.3 Influencia del pH:**

El diagrama Eh-pH para el sistema oro cianuro indica que la fuerza electroquímica que conduce la disolución es maximizada cuando el valor de pH se encuentra entre 9.0 y 9.5 aproximadamente.

Para modificar el pH se pueden utilizar diferentes tipos de álcalis pero el más utilizado a nivel industrial es el hidróxido de calcio; cuyas funciones principales en la cianuración son: prevenir las pérdidas de cianuro por hidrólisis, neutralizar compuestos ácidos, y ayudar a la floculación o sedimentación de partículas, clarificando la solución y permitiendo que se pueda separar el mineral de la solución rica.

Sin embargo algunos investigadores han determinado que la velocidad de disolución disminuye rápidamente con la adición de cal, cuando se esta cerca de pH 11 y casi nula cuando se acerca a 12. Esta influencia se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7. Influencia de la concentración de álcalis.**

% NaOH	Disolución mg/cm <sup>2</sup> /h
0.012	1.69
0.022	1.70
0.051	1.69
0.11	1.58
0.16	1.43
0.30	1.46
% CaOH	Disolución mg/cm <sup>2</sup> /h
0.00	1.46
0.002	1.51
0.006	1.63
0.009	1.85
0.012	1.68
0.019	1.23
0.031	0.92
0.047	0.68
0.077	0.41

Fuente: instituto tecnológico geominero de España. Minería química.1991 pg 209

#### **2.8.3.4 Efecto de la concentración de oxígeno**

El oxígeno es el principal promotor de la disolución de metales preciosos en soluciones cianuradas. Para este propósito suele utilizarse el oxígeno absorbido por las soluciones circulante, agitadas y muchas veces como adición en los tanques de cianuración; este efecto es visualizado en la tabla 8, donde se plasma que el aumento de la concentración de oxígeno en la disolución aumenta hasta un máximo, por el cual disminuye la disolución, pero este máximo, aumenta con la concentración de cianuro. La concentración de oxígeno que presenta mayor razón de disolución no esta definida, pero se cree que esta entre 14 y 28 mg de O<sub>2</sub> por litro de solución o entre 31 y 62% de saturación.

Aunque el exceso de oxígeno puede disminuir la velocidad de disolución, en la practica los minerales de oro contienen constituyentes consumidores de oxígeno que retardan o inhiben la disolución.

Tabla 8. Efecto del oxígeno en la cianuración.

% NaCN	mg.O <sub>2</sub> /litro	Disolución mg/cm <sup>2</sup> por h.
0,01	10,0	0,65
	17,5	0,75
	28,4	0,52
	31,5	0,58
	34,6	0,20
0,025	10,0	1,67
	12,3	1,62
	17,7	1,55
0,25	21,3	1,70
	26,8	1,03
	32,2	0,72
	9,5	1,54
	13,6	2,11
	22,7	2,22
	28,6	1,76
0,10	33,6	1,80
	2,8	0,30
	4,0	0,54
	9,0	1,80
	14,2	2,63
	17,2	2,40
	24,6	2,01
0,20	31,0	1,81
	9,0	1,78
	14,3	2,80
	22,5	3,70
	27,8	4,15
0,50	33,5	3,30
	10,0	1,40
	12,5	2,28
	15,5	2,56
	18,0	3,19
	20,5	3,38
	22,3	3,55
	23,7	4,49
27,4	3,84	
29,4	2,00	

Fuente: instituto tecnológico geominero de España. Minería química.1991 pg 210

### **2.8.3.5 Efecto de la temperatura en la cianuración:**

Cuando se aplica calor a una solución de cianuro, que contiene oro hay dos factores que influyen en la velocidad de disolución. El aumento de la temperatura agiliza la actividad de la solución y consecuentemente acelera la velocidad de disolución. Al mismo tiempo la cantidad de oxígeno en la solución disminuye por que la solubilidad de los gases en solución también lo hace.

En la practica el uso de soluciones calientes para extracción de oro en una mena, tiene muchas ventajas, tales el costo de calentamiento de la pulpa, el aumento de descomposición de cianuro debido la energía extra suministrada, y aumento de actividad entre cianuro- cianicidas.

### **2.8.3.6 Efecto de la agitación:**

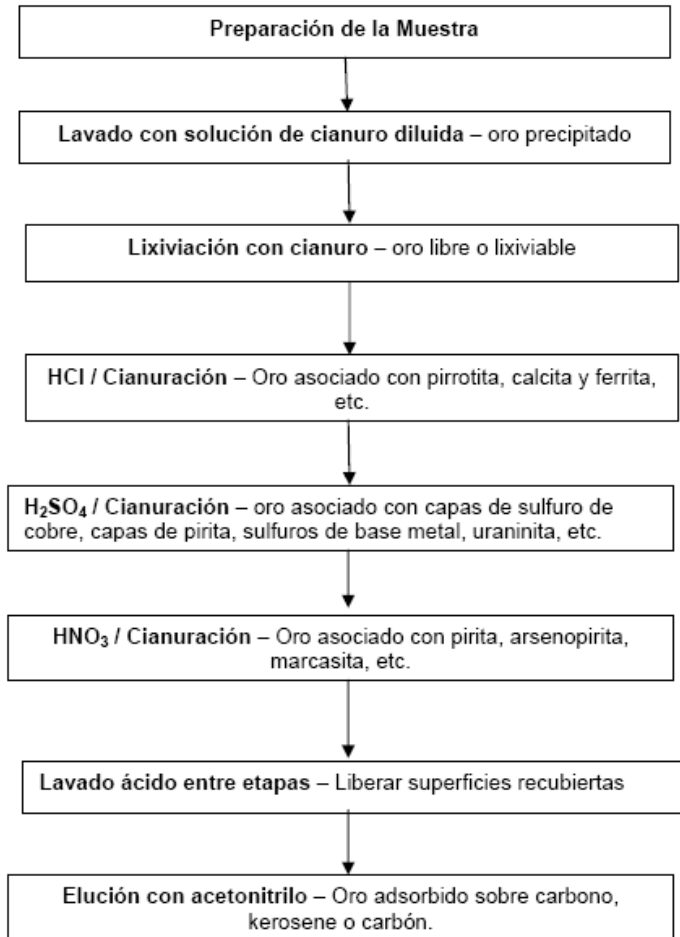
La disolución de oro es controlada usualmente por el transporte de masa dentro de las condiciones normalmente aplicadas para la lixiviación por cianuración. El incremento incrementa la velocidad de disolución hasta un máximo.

## **2.8.4 LIXIVIACIÓN DIAGNOSTICO DE MINERALES DE ORO**

### **2.8.4.1 Generalidades**

El concepto de lixiviación diagnostico, es muy simple. El mineral menos estable presente en la matriz de la muestra, es solubilizado primero en un medio acuoso ácido. El residuo es filtrado, lavado (agua /solución de ácido diluido) y cianurado para extraer el oro liberado durante la etapa de destrucción del mineral menos estable en la matriz de la muestra y el cual se encontraba asociado, luego los sólidos son lavados con solución diluida de cianuro y alistada para repetir el procedimiento de destrucción del siguiente mineral que pueda estar asociado con el oro. El proceso se repite con una

lixiviación acida cada vez mas oxidada hasta que todo el oro no refractario y recianurado es lixiviado por el cianuro obteniéndose la cantidad de de oro asociado con cada uno de los minerales presentes en la matriz de la muestra. En la figura 7 se puede observar el diagrama de flujo de la lixiviación diagnostico para una mejor idea.



**Figura 7. Lixiviación Diagnostico**

Fuente: Lorenze, L; some guidelines to design of a diagnostic leaching vol 8 pag247 de 1985

### **3. METODOLOGÍA**

#### **FASE 1: Revisión Bibliográfica**

##### **Actividad 1:**

Se revisaron manuales relacionados con el conocimiento y manejo de la metodología de procesos de beneficio de minerales auroargentíferos, para escoger el mejor proceso que mejore el utilizado por los mineros artesanales de la región.

##### **Actividad 2:**

Se preparo un informe a la empresa donde se comparaban las ventajas y desventajas de los diferentes procesos de cianuración tanto de rendimiento como económicos.

Tiempo que requirió: 3 semanas

#### **FASE 2: Montaje Del Laboratorio De Pruebas.**

##### **Actividad 1:**

Con ayuda de los laboratoristas del la planta de Titiribí Antioquia se procedió a hacer un inventario de equipos y reactivos que se necesitaban para realizar las pruebas necesarias para caracterizar e identificar el mineral y su proceso de extracción.

### **Actividad 2:**

Se instaló los equipos y se hicieron las adecuaciones de espacio para el laboratorio tanto de beneficio como para la parte de hidro metalurgia.

Tiempo que requirió: 2 semanas

### **FASE 3: Caracterización Del Mineral**

#### **Actividad 1:**

Se hicieron diversos ensayos para poder caracterizar el mineral tanto física como químicamente el mineral para lo que se consultaron normas para ensayo al fuego, concentración gravimétrica, lixiviación, lixiviación diagnóstico, etc.

#### **Actividad 2:**

Se encontró la granulometría donde se encontraba la mayor concentración de oro para encontrar el método de separación gravimétrico más eficaz.

Tiempo que requirió: 2 meses

### **FASE 4: Diseño Y Montaje Del Circuito De Beneficio.**

#### **Actividad 1:**

Una vez terminada la caracterización del mineral y con el equipo que quedó de la compañía Griffos Company vinculada a recuperación de las víctimas de un grupo armado se procedió al diseño y montaje de circuito de beneficio.

**Actividad 2:**

Después se puso en marcha el montaje con el fin de hacer las diferentes correcciones al proceso.

Tiempo que requirió: 4 meses y 3 semanas

**FASE 5: Diseño De La Planta De Cianuración****Actividad 1:**

Una vez caracterizado el mineral y paralelamente al montaje de la planta de beneficio se procedió al diseño de la planta de cianuración con los resultados de lixiviación diagnóstico y capacidad de la planta de beneficio.

**Actividad 2:**

Se compararon los diferentes métodos de cianuración y se encontró el más rentable el cual se propuso a disposición de la junta directiva de la empresa.

Tiempo que requirió: 1 mes y 2 semanas.

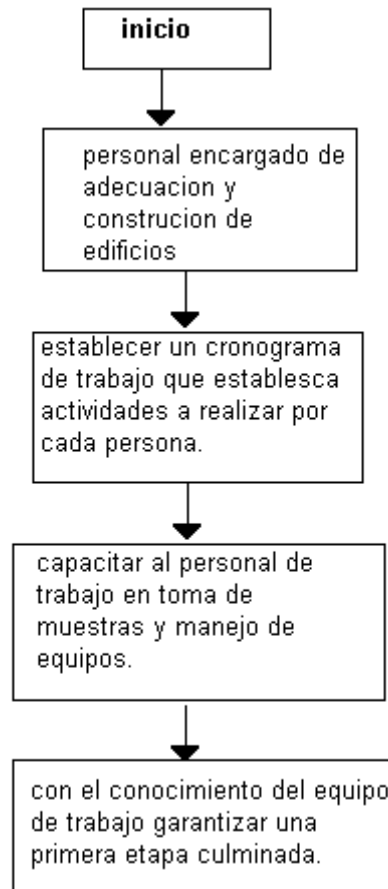
## **4. RESULTADOS.**

### **4.1 Resultados del montaje y puesta en marcha del laboratorio.**

El proyecto de mejoramiento de los procesos de beneficio y tratamientos auroargentíferos de la zona minera de San Martín de Loba, Mina El Eje (sur de Bolívar) se desarrolló en un tiempo de 6 meses de trabajo de campo y el cual se plasma en los siguientes flujogramas que orientan de manera ágil el enfoque, estructura y desarrollo del proyecto. En la figura se aprecia la planeación inicial con la que debe contar el proyecto la cual es descrita en los siguientes pasos.

1. disponer de personal que se encargue de adecuación de terreno y construcción de edificios.
2. crear un cronograma de trabajo que establezca las actividades específicas a realizar por cada persona.
3. hacer una capacitación al personal de trabajo sobre manejo de equipos y toma de muestras in situ.
4. el personal de trabajo debe conocer las características del terreno además debe tener idea de hacer un muestreo y manejo de equipos.

Las actividades de la figura 8 fueron realizadas paralelamente con la primera etapa del proyecto, con el fin de no perder tiempo, y poder revisar todos los equipos.



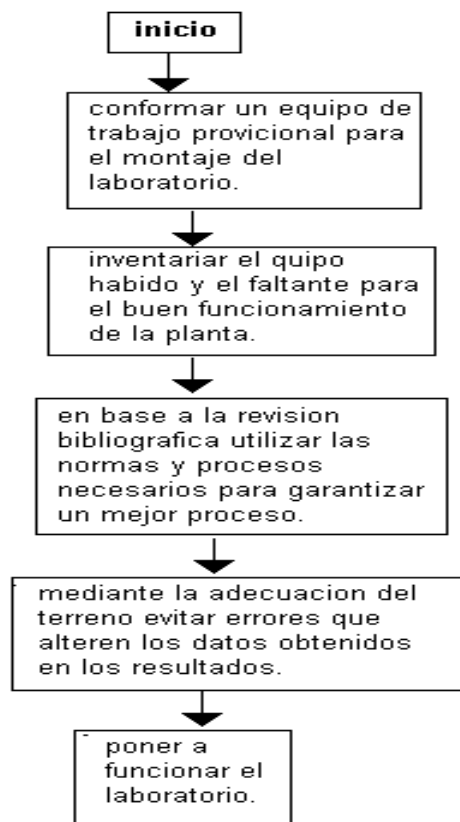
**Figura 8. Instructivo de la primera etapa del proyecto.**

Fuente: autor

La figura 9 reúne los procesos de la etapa 2 de este proyecto el cual consta de:

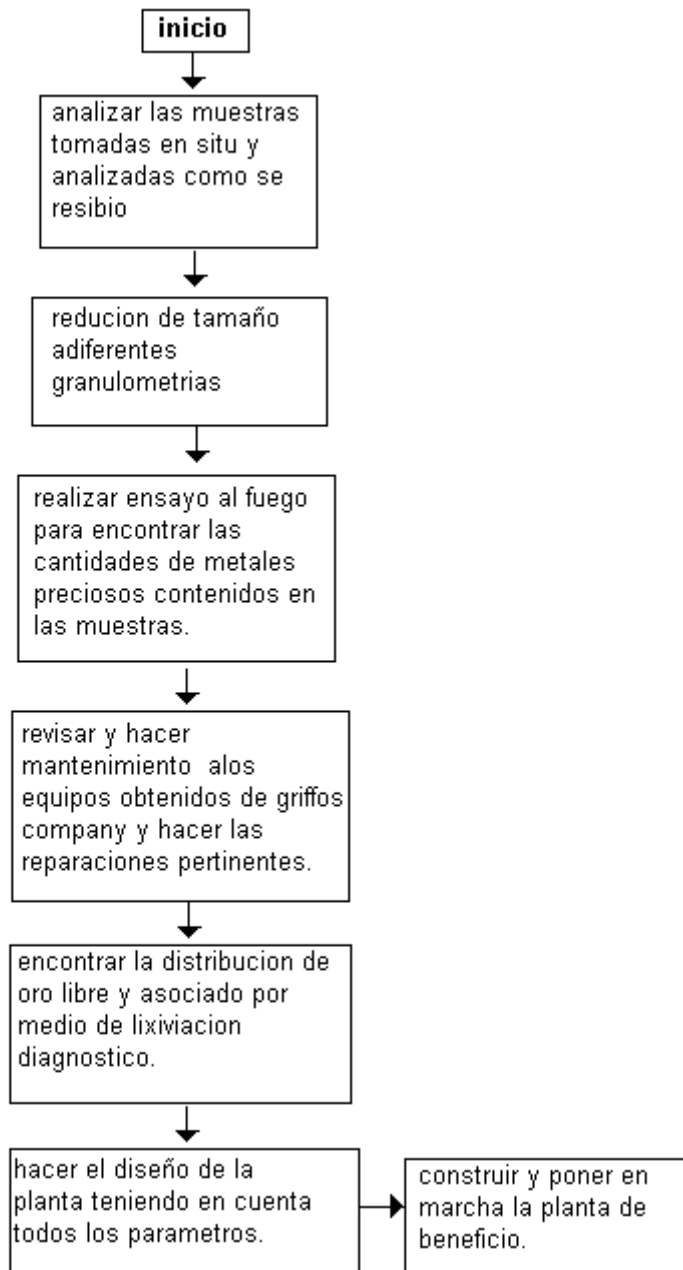
1. crear un equipo de trabajo que consta de 3 laboratoristas de la planta de titiribí Antioquia, para inventariar el equipo dejado por la compañía griffos y establecer el faltante para crear el laboratorio de pruebas.

2. hacer un cronograma de trabajo, estableciendo las funciones de cada uno de los miembros del equipo.
3. identificar las pruebas a realizar en el laboratorio con sus respectivas normas.
4. garantizar el mínimo margen de error de los resultados obtenidos en el laboratorio mediante estudio de terreno.
5. con base en las normas hacer el inventario de reactivos necesarios.



**Figura 9. Instructivo segunda etapa del proyecto.**

Fuente: autor



**Figura 10. Instructivo de la etapa 3,4 y 5.**

Fuente: autor

En el flujo grama 10 se plasma las fases 3,4 y 5 en serie y el cual se divide así:

1. toma de muestra representativa, tomada in situ por geólogos.
2. proceso de reducción de tamaño hasta 200 mallas.
3. ensayo al fuego para encontrar la cantidad de oro y plata presentes en las muestras.
4. por medio de procesos gravimetricos observar la viabilidad de los equipos destinados para la planta.
5. recurrir ala lixiviación diagnostico para encontrar la distribución de oro y asociados canecidas.
6. hacer un diseño de planta de beneficio con capacidad para 20 ton diarias.
7. poner en marcha la construcción de la planta.
8. dependiendo de los datos obtenidos en la caracterización se diseño la planta de cianuración comparando 3 métodos de cianuración teniendo en cuenta parámetros como tiempo, porcentaje de oro recuperado, y factores económicos.
9. se escogió un método de cianuración por agitación mas inyección de oxigeno en tanques cilindro cónicos con especificaciones según la denver el cual se analizará mas adelante.
10. con base a los mismos parámetros se escogió el método de precipitación de metales preciosos mas adecuado.
11. se presento el diseño de la planta de cianuración a consideración de la empresa.

12. se inicio los ensayos de producción para evaluar correcciones pertinentes.

En un principio la prioridad de la compañía minera el zancudo era la construcción del laboratorio, para lo cual se dispuso un equipo de obreros y laboratoristas para la adecuación de terreno y montaje de equipos cuyas características de terreno eran:

- lo mas alejado del montaje principal para evitar que las vibraciones producidas por el molino de bolas afecten las balanzas analíticas.
- Aislar la zona de pesado para evitar que el polvo y demás factores del ambiente influyan en el valor leído.
- La zona de desagüe de desechos líquidos y sólidos estén alejados de cualquier vertiente hídrica y controlados en recipientes de fibra de vidrio.

Una vez adecuado el terreno y construidos los edificios se instalo los siguientes equipos.

- ✓ Una trituradora de mandíbulas para laboratorio con un motor de
- ✓ Un tambor con bolas de acero para la etapa de molienda.
- ✓ Un molino de disco para remoler las muestras.
- ✓ Una mufla con termostato.
- ✓ Una mesa tipo wifley para laboratorio con capacidad de 50 kilos /hora.
- ✓ Una estufa eléctrica de 4 puestos.

- ✓ Una balanza analítica de 5 cifras.
- ✓ Una gramera digital.
- ✓ Un vibrador un su juego de tamices.
- ✓ 3 bombas de 3 HP cada una para el bombeo de agua y residuos líquidos.
- ✓ Además de la vidriería y reactivos necesarios para la pruebas de caracterización y diseño del proceso.

Se dispuso de un terrero de media hectárea para adecuación del laboratorio tanto de beneficio como de hidrometalurgia y se dispuso hacer pruebas.

#### **4.2 CARACTERIZACION MINERALOGICA DE LAS MUESTRAS DEL COMPOSITO DE LA MINA EL “EJE”.**

Para la conformación del composito correspondiente a cada tipo de mena, se seleccionaron diferentes muestras de diferentes frentes de trabajo de la mina en estudio. Estas muestras fueron caracterizadas mineralógicamente y acorde a sus características se procedió a conformar los diferentes tipos de menas.

Las pruebas de caracterización fueron realizadas por personal de ingeominas en Cali; mientras que las pruebas de granulometría fueron hechas en el laboratorio de titiribí Antioquia.

#### 4.2.1 Conformación Del Composito Del Eje.

En la conformación del composito, se escogieron 2 diferentes frentes de trabajo cada uno aportando cierto número de muestras; las cuales se enuncian continuación:

✓ Frente Don cesar: A2, A3, A7, A9, A11, A12, A13, A19, A25, A27, A29, A31

✓ Frente marquitos: T12, TA15,T19,T22, TA17,T20

**Tabla 9. Descripción de la textura y estructura de las muestras.**

No	MUESTRA	FORMA	COLOR	OBSERVACIONES
<b>Frente Don cesar</b>				
1	A2	Maciza	Gris amarilla	Fragmentos de granítica maciza
2	A3	Taxitica	Gris rojizo	Venillas de cuarzo oxidadas.
3	A7	Taxitica-masiva	Gris oscuro	Oxido de hierro ,presenta fracturas
4	A9	Taxitica-maciza	Gris blancuzco	Alto contenido de feldespatos
5	A11	Taxitica-maciza	Blanco grisáceo	Fragmentos de ángulos de feldespatos
6	A12	Taxitica-masiva	Gris oscuro	Flanirinica, presencia de feldespatos
7	A13	Taxitica-maciza	Blanco grisáceo	Producto de alteración minerales primarios
8	A19	Taxitica-masiva	Gris oscuro	Venillas de sulfuros
9	A25	Maciza – masiva	Gris oscuro	Patinas de hierro y sulfuros de hierro

10	A27	Porosa	Blanco grisáceo	Alteración de sulfuros
11	A29	Porosa	Pardo oscuro	Pirita afectada hidrotermalmente
12	A31	Maciza	Blanco grisáceo	Patinas de oxido de hierro
<b>Frente marquitos</b>				
13	T12	Maciza	Gris claro	Presencia de oxido de hierro
14	TA15	Maciza	Pardo rojizo	Silicidificacion, fragmentos oxidados
15	T19	Taxitica-maciza	Gris claro	Recubrimiento de platinas color pardo amarillo
16	T22	Porosa	pardo	Afectada procesos hidrotermales
17	TA17	Taxitica-maciza	Gris oscuro	Patinas de hierro y sulfuros de hierro
18	T20	Taxitica-maciza	Gris oscuro	Patinas de oxido de hierro

Fuente: autor

Estos análisis fueron hechos con lupa por el geólogo de la planta de titiribí Antioquia quien reporto estos resultados.

#### **4.2.1.1 Composición Mineralógica Del Composito.**

La mayoría de las muestras esta conformada de la siguiente manera: entre los minerales de la mena se encontró pirita, calcopirita, galena, los minerales de alteración que se apreciaron fueron: sericita, moscovita, hematina- goletita, y calcita; los minerales de ganga se encontraron el cuarzo, biotita y plagioclasa en las siguientes proporciones:

✓ **Minerales de mena:**

Pirita: 9%

Escalerita y galena: 2.5%

✓ **Minerales de alteración:**

Sericita: 15.5%

Hematina y goethita: 5.0%

✓ **Minerales de ganga:**

Cuarzo: 45%

Biotita: 14.5%

Plagioclasa: 8.5%

#### **4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y METALÚRGICA DEL MINERAL**

Al recibir las muestras el primer tratamiento que se le dio fue una reducción de tamaño utilizando una trituradora de mandíbula para luego pasarla aun barril que simulaba el molino de bolas; el cual se puede apreciar en la figura 11.

Donde se agrego una carga de 1500 gramos de bolas para 150 gramos de mineral, luego se realizo ensayos al fuego de las muestras.



**Figura 11. barriles utilizados para molienda.**

Fuente: autor

#### **4.3.1. Resultados ensayo al fuego.**

Se realizo ensayos al fuego para encontrar una ley aproximada del material; las condiciones de ensayo fueron las siguientes:

- ✓ Temperatura de tostación: 700- 750°C
- ✓ Tiempo de tostación: 40min.
- ✓ Temperatura de fusión: 900- 1000°C

- ✓ Tiempo de fusión: 1h
- ✓ Temperatura de copelación: 900°C
- ✓ Peso del mineral: 30g
- ✓ Peso del litargirio: 40g
- ✓ Peso del carbonato de sodio : 40g
- ✓ Peso de bórax: 10g
- ✓ Peso de harina de trigo: 5 g

Los resultados se presentan en la tabla 10 claramente.

**Tabla 10. Resultados Ensayo Al Fuego.**

MUESTRA	TENOR(G/TON)	
	Au	Ag
A2	15.70	122.32
A3	25.30	175.12
A7	10.11	95.37
A9	7.05	91.02
A11	14.8	250.36
A12	5.06	66.88
A13	8.96	126.55
A19	22.98	277.88
A25	75.34	1020.33
A27	4.55	68.12
A29	11.34	127.33
A31	2.5	55.11
T12	24.19	87.09

<b>TA15</b>	9.74	134.36
<b>T19</b>	10.87	140.32
<b>T22</b>	1.26	76.36
<b>TA17</b>	18.89	199.37
<b>T20</b>	7.68	88.67

Fuente: autor

Respecto al composito el tenor promedio es de 15.35 gramos de oro por ton de mineral y de plata 177.91 gramos por tonelada.

#### **4.3.2. Resultados lixiviación diagnostico.**

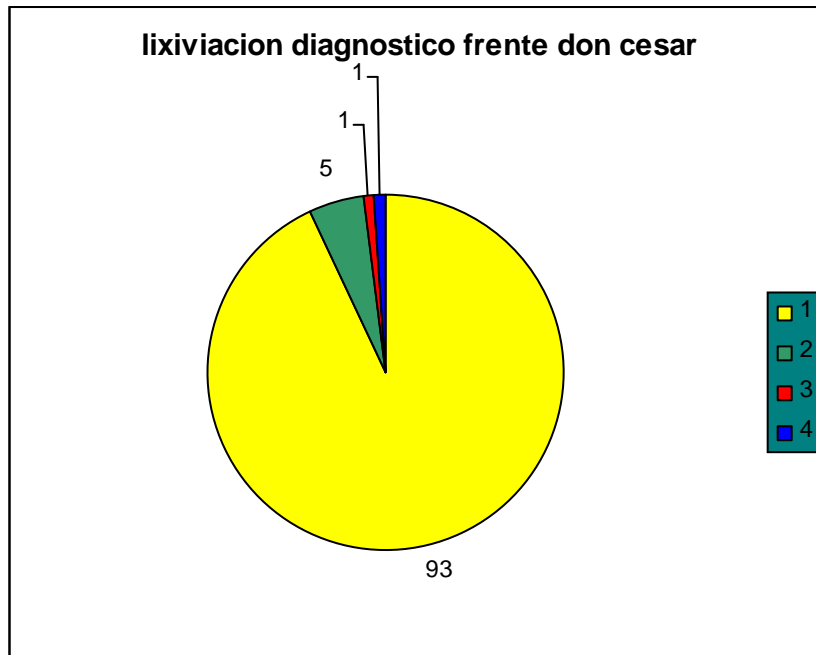
Con el fin de determinar las asociaciones mineralógicas responsables de la refractariedad, el mineral fue sometido al procedimiento de lixiviación diagnostico para arrojar los resultados de la tabla 11.

**Tabla 11. Resultados Lixiviación Diagnostico.**

<b>Tipo de oro</b>	<b>Clasificación</b>	<b>% en la muestra</b>	<b>Frente don cesar</b>	<b>Frente marquitos</b>
<b>Tipo I</b>	<b>Oro libre y expuesto</b>		<b>93</b>	<b>89</b>
<b>Tipo II</b>	<b>Oro asociado con silicatos</b>		<b>5</b>	<b>7.5</b>
<b>Tipo III</b>	<b>Oro asociado con pirrotita, ferrita, dolomita, galena, carbonato de calcio.</b>		<b>1</b>	<b>2.63</b>
<b>Tipo IV</b>	<b>Oro asociado con capas de sulfuro de cobre, uraninita, escalerita, sulfuros base metal, capas de pirita.</b>		<b>1</b>	<b>0.87</b>
<b>Tipo V</b>	<b>Oro asociado con pirita, arsenopirita, marcasita</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fuente: autor

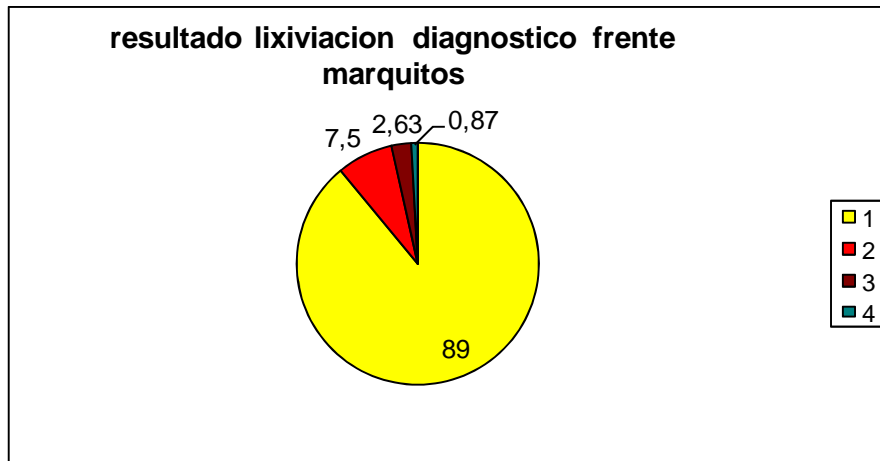
En las figuras 12 y 13 se puede ver mejor estos resultados los cuales se discutirán en el análisis de resultados.



**Figura 12. Resultados Lixiviación Diagnostico Frente Don Cesar.**

Fuente: autor

1. oro libre o expuesto tipo I
2. oro tipo II
3. oro tipo III
4. oro tipo IV



**Figura 13. Resultados Lixiviación Diagnostico Frente Marquitos.**

Fuente: autor

1. oro tipo I
2. oro tipo II
3. oro tipo III
4. oro tipo IV

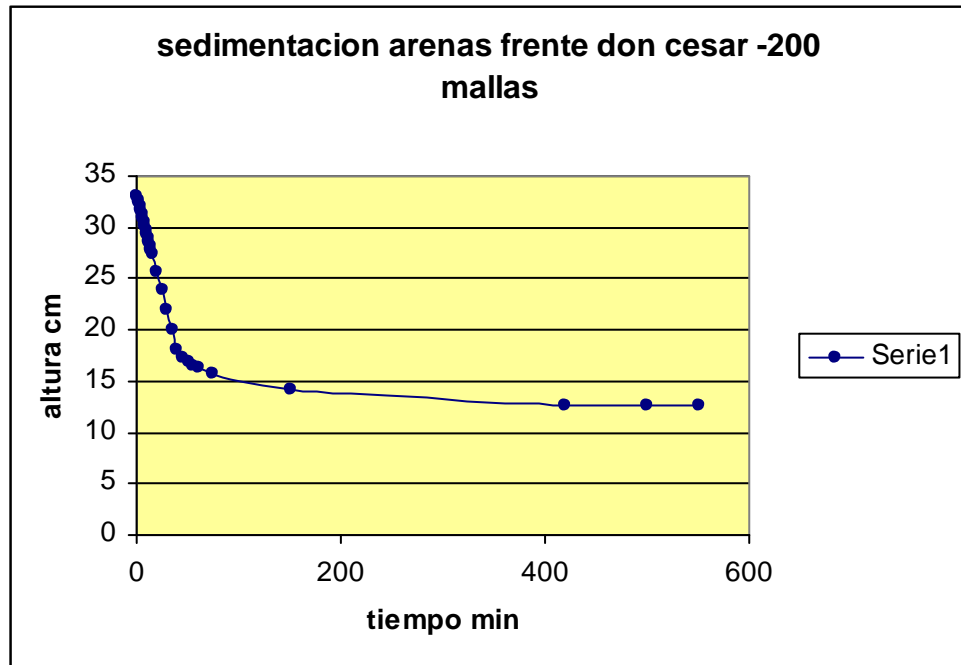
#### **RESULTADOS CIANURACIÓN CONVENCIONAL.**

Con respecto a los resultados de tenor encontrados en el ensayo al fuego donde se obtuvo una ley de 15.35 g de oro por ton de mineral tratado y este fue el dato utilizado para comparar la disolución de oro durante el proceso de lixiviación con cianuro de sodio a diferentes concentraciones de solución y granulometrías; para esto se hicieron pruebas de sedimentación de las arenas pues en un principio este era la forma con la que clarificaban la solución en la empresa anterior las cuales se pueden observar en las figuras 14 y 15 y las tabla 12.

**Tabla 12. Resultados Sedimentación Frente Don Cesar.**

<b>Frente don cesar ty (-)200 mallas tiempo (min)</b>	<b>altura(cm.)</b>	
0		33
1		32,7
2		32,4
3		32
4		31,65
5		31,25
6		30,9
7		30,5
8		30,1
9		29,7
10		29,3
11		28,9
12		28,6
13		28,2
14		27,85
15		27,5
20		25,7
25		23,9
30		22
35		20,1
40		18,1
45		17,3
50		16,9
55		16,5
60		16,3
75		15,7
150		14,2
420		12,7
500		12,7
550		12,7

Fuente: autor



**Figura 14. Resultados Sedimentación Frente Don Cesar.**  
Fuente: autor

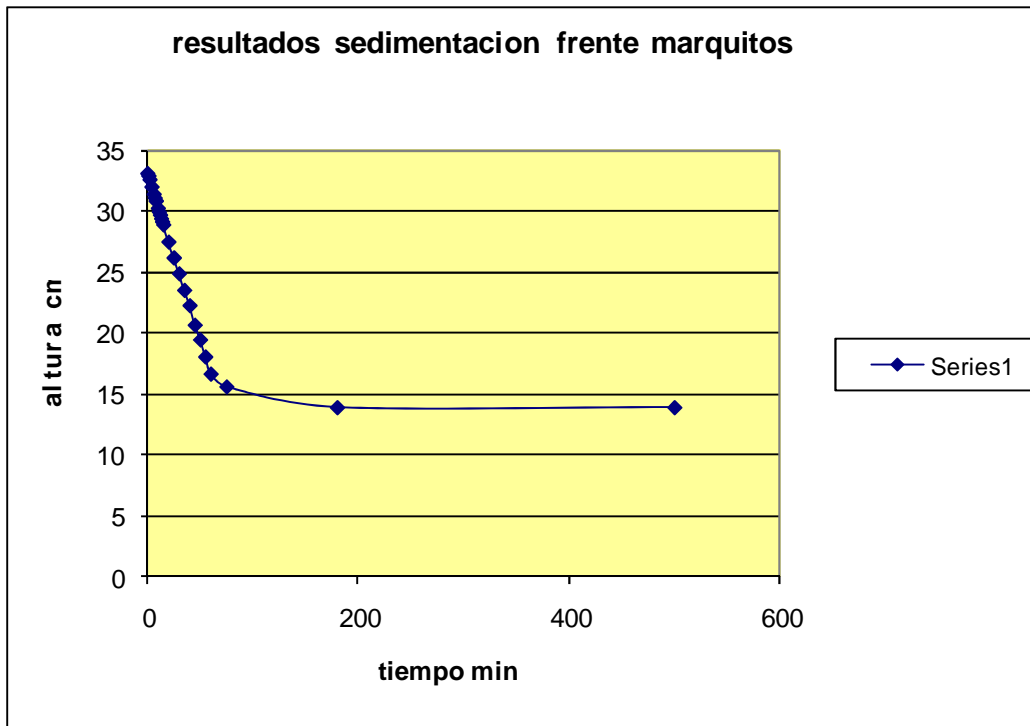
**Tabla 13. Resultados Sedimentación Frente Marquitos.**

**Frente Marquitos - 200 mallas**

<b>tiempo (min)</b>	<b>altura(cm)</b>
0	33
1	32,8
2	32,5
4	31,9
6	31,3
7	31
8	30,75
10	30,15
11	29,85
12	29,6
13	29,3
14	29,05
15	28,8
20	27,4

25	26,1
30	24,8
35	23,45
40	22,2
45	20,6
50	19,4
55	18
60	16,6
75	15,55
180	13,85
500	13,85

Fuente: autor



**Figura 15. Resultados Sedimentación Frente Marquitos.**

Fuente: autor

#### 4.3.3.1 Resultados Cianuración Convencional Frente Don Cesar

Tabla 14. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías.

Consumo de cianuro (Kg/ Ton de mineral)		
Tiempo (horas)	-100 a 200 Ty	-200Ty
0	0	0
4	0.49	1.504
8	0.92	2.379
16	1.70	3.310
24	2.36	3.97

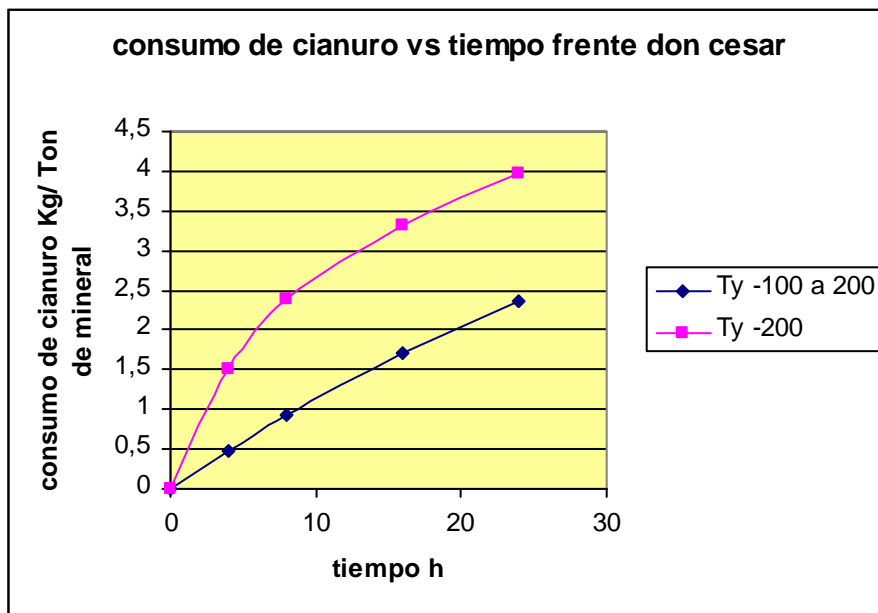
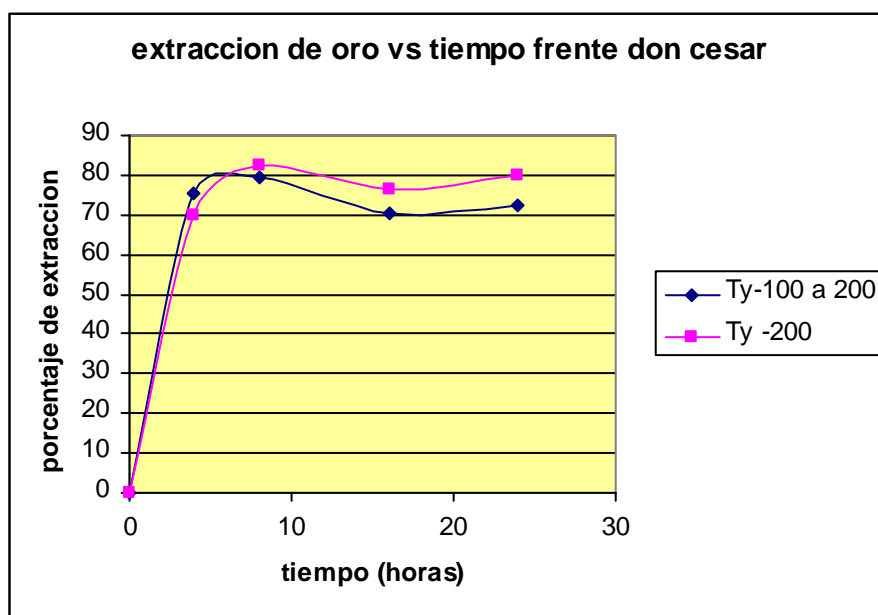


Figura 16. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías.

Fuente: autor

**Tabla 15. Porcentaje De Extracción De Oro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías (Frente Don Cesar).**

Porcentaje de extracción de oro (%)		
Tiempo (horas)	Ty-100 a 200	Ty-200
0	0	0
4	75.35	70.12
8	79.67	82.48
16	70.19	76.46
24	72.56	80.11



**Figura 17. Porcentaje De Extracción De Oro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías (Frente Don Cesar).**

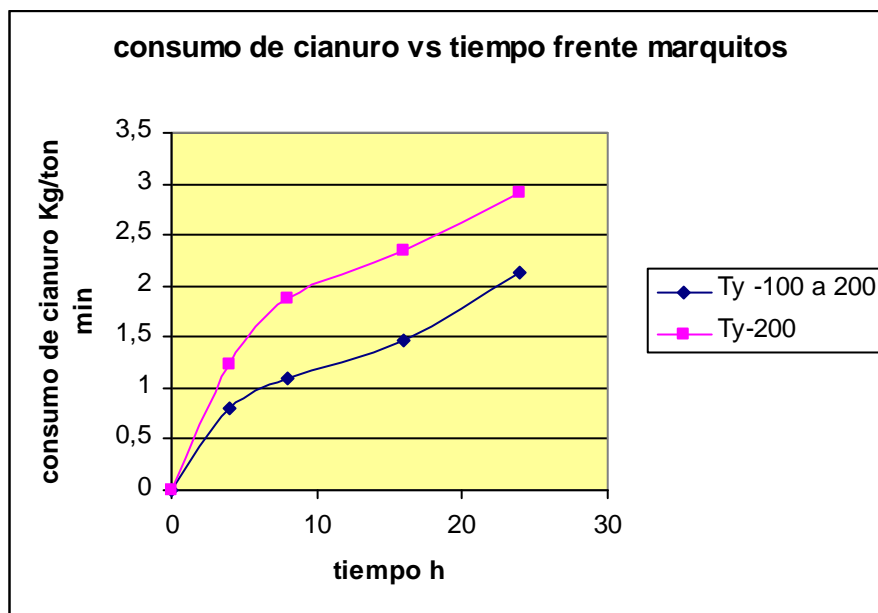
Fuente: autor

#### 4.3.3.2 Resultados Cianuración Convencional Frente Marquitos.

Tabla 16. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías.

Consumo de cianuro – Kg/ Ton de mineral.		
Tiempo en horas	Ty -100 a 200	Ty-200
0	0	0
4	0.80	1.23
8	1.09	1.87
16	1.46	2.35
24	2.13	2.91

Figura 18. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías.

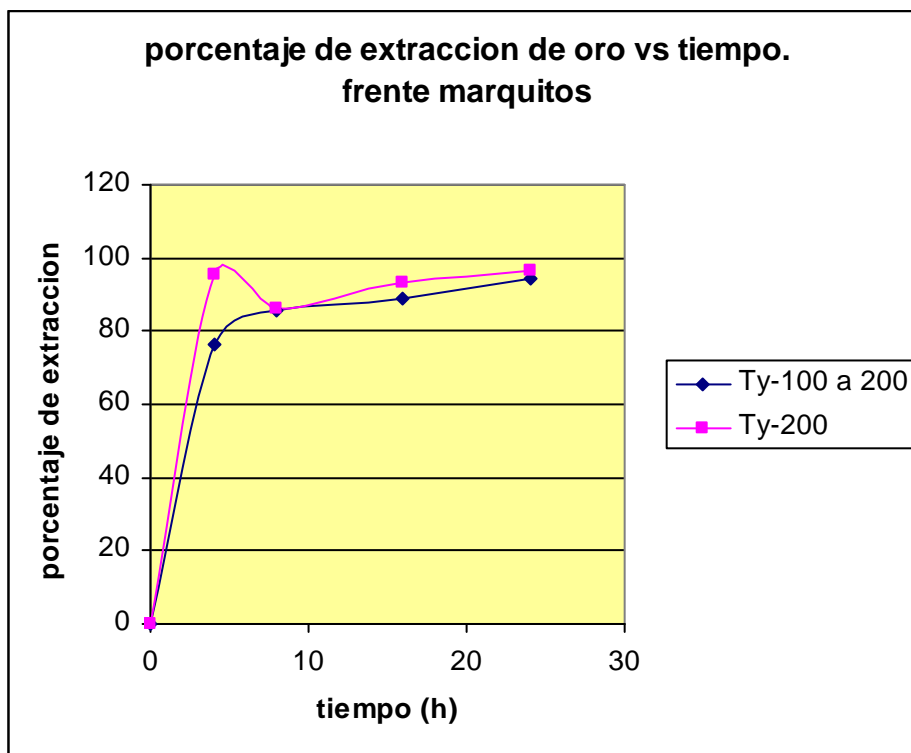


Fuente: autor

**Tabla 17. Porcentaje De Extracción De Oro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías (Frente Marquitos).**

Porcentaje extracción de oro %		
Tiempo ( horas)	Ty -100 a 200	Ty -200
0	0	0
4	76.13	95.55
8	85.38	86.36
16	89.16	93.02
24	94.57	96.48

Fuente: autor



**Figura 19. Porcentaje De Extracción De Oro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías (Frente Marquitos).**

Fuente: autor

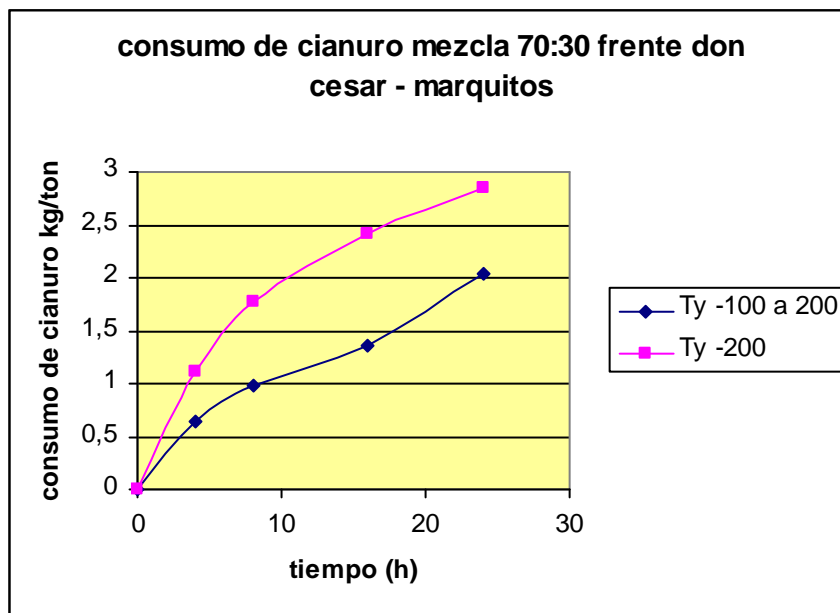
#### 4.3.3.3 Resultados Cianuración Convencional Mezcla Dos Muestras.

Debido a su comportamiento similar se hizo una mezcla de las 2 muestras según condiciones reales de producción y estimado, para ver el comportamiento de esta.

**Tabla 18. Consumo De Cianuro Vs. Tiempo. Diferentes Granulometrías; Frente Don Cesar- Marquitos En Porciones 70:30 Respectivamente**

Consumo de cianuro Kg /Ton de mineral		
Tiempo ( horas)	Ty -100 a 200	Ty-200
0	0	0
4	0.65	1.12
8	0.98	1.78
16	1.36	2.41
24	2.04	2.84

Fuente: autor

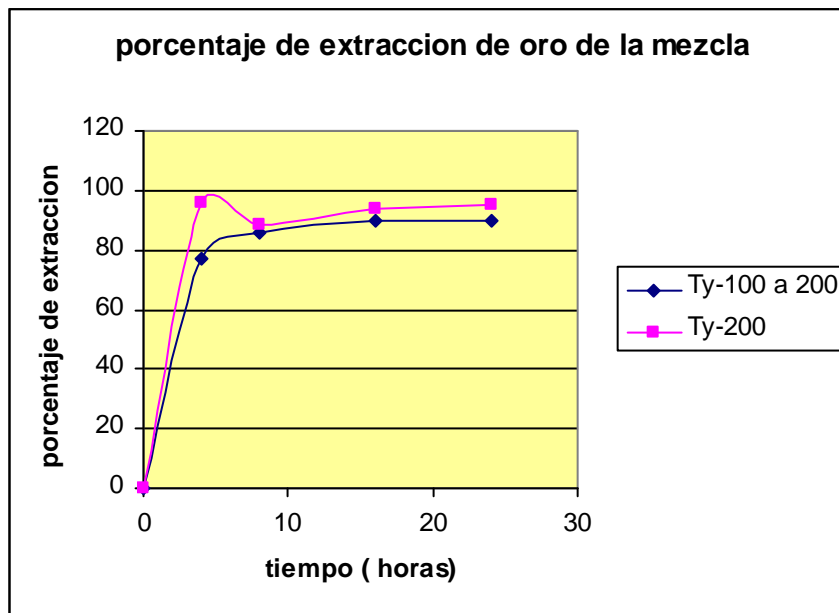


**Figura 20. Consumo de cianuro vs. Tiempo. Diferentes granulometrías; frente don cesar- marquitos en porciones 70:30 respectivamente.**

Fuente: autor

**Tabla 19. Porcentaje de extracción de oro vs. Tiempo. Diferentes granulometrías frente don cesar- marquitos en porciones 70:30 respectivamente.**

Porcentaje de extracción de oro mezcla %		
Tiempo ( horas)	Ty-100 a 200	Ty -200
0	0	0
4	76.89	95.7
8	86.01	88.51
16	90.05	94.12
24	90.15	95.19



**Figura 21. Porcentaje de extracción de oro vs. Tiempo. Diferentes granulometrías frente don cesar- marquitos en porciones 70:30 respectivamente.**

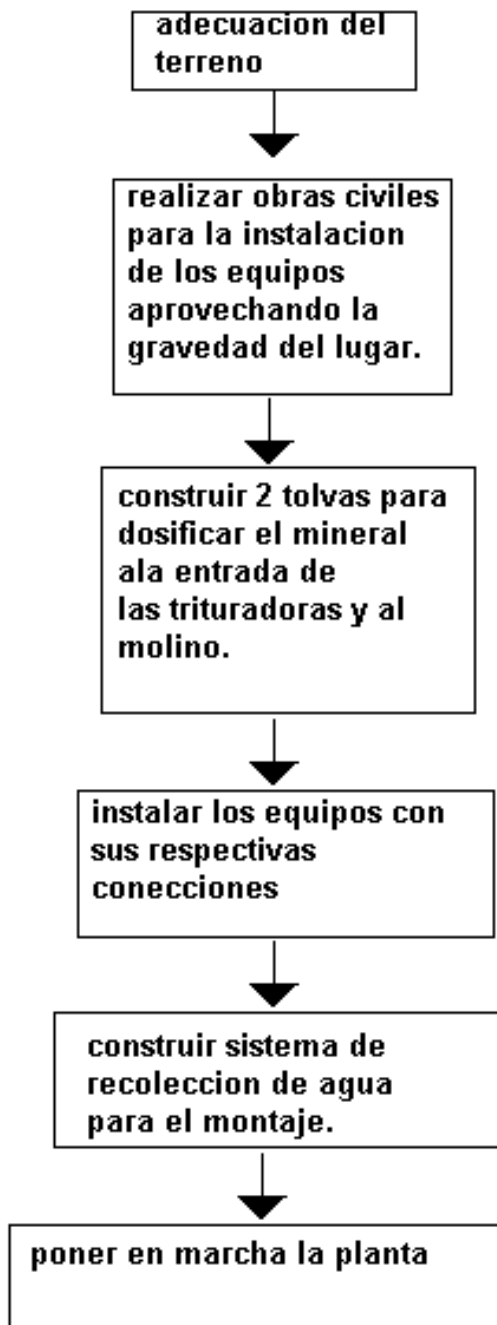
#### **4.4 Diseño y montaje de la planta de beneficio.**

Para el diseño y montaje de la planta de beneficio se contó con:

- ✓ una trituradora primaria de mandíbulas.
- ✓ Una trituradora secundaria.
- ✓ 1 molino de bolas de: 3m de diámetro por 3m de largo
- ✓ 1 jigs panamerican tipo denver.
- ✓ 1 mesa gravimetrica tipo wifley capacidad 1.5 ton/h
- ✓ 1 tornillo sin fin
- ✓ Bandas transportadoras.

Una vez terminado los estudios de suelos hechos por un Ing. civil y un geólogo se estableció el terreno más apropiado para construir el montaje y se procedió a adecuación.

La figura 22 muestra claramente los pasos que se siguieron:



**Figura 22. Montaje de la planta de beneficio**

Fuente: autor



**Figura 23. Zona de descargue de material capacidad 35 ton mineral fresco.**

Fuente: autor

Una vez es sacado el mineral de los 2 frentes de trabajo es llevado ala primera zona de descargue de mineral con capacidad para 35 ton de mineral fresco.



**Figura 24. Tolva de cargue de mineral a la planta. Capacidad 16 ton.**

Fuente: autor

La figura muestra la primera tolva antes de pasar a la trituradora primaria  
Pero se puede apreciar de perfil en la figura 25.



**Figura 25. Tolva y trituradora primaria.**

Fuente: autor



**Figura 26. Trituradora secundaria.**

Fuente: autor



**Figura 27. Molino de bolas.**

Fuente: autor



**Figura 28. Jigs panamericam.**

Fuente: autor



**Figura 29. Mesa Concentradora Tipo Wifley**

Fuente: autor

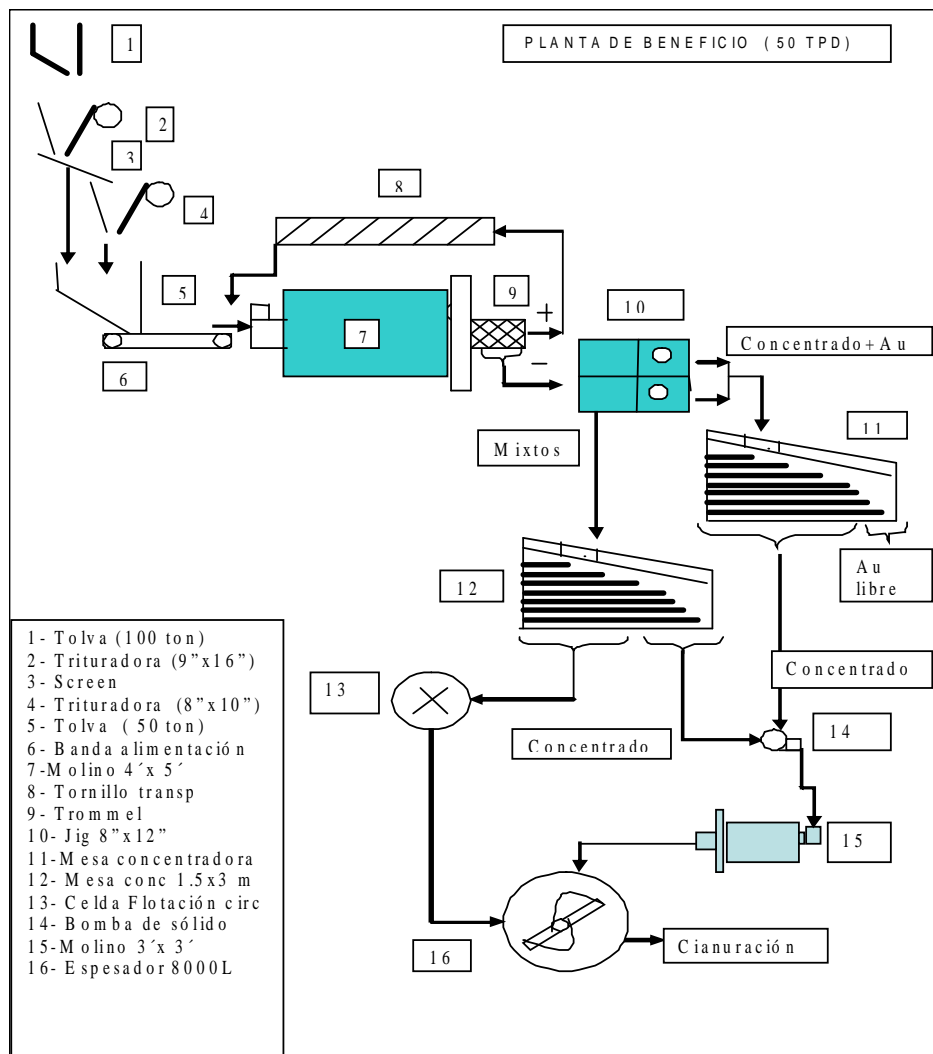


**Figura 30. Planta de beneficio con su sistema de dosificación de agua.**

Fuente: autor

#### 4.4.1. Diseño de esquema sistema de beneficio mejorado para la mina el eje.

Una vez puesto en marcha el montaje se analizaron las falencias y se hizo el diseño de un montaje con capacidad de 50 ton/ día, utilizando los equipos con los que cuenta el montaje actual mas los necesarios para mejorarlo y ampliar su rango.

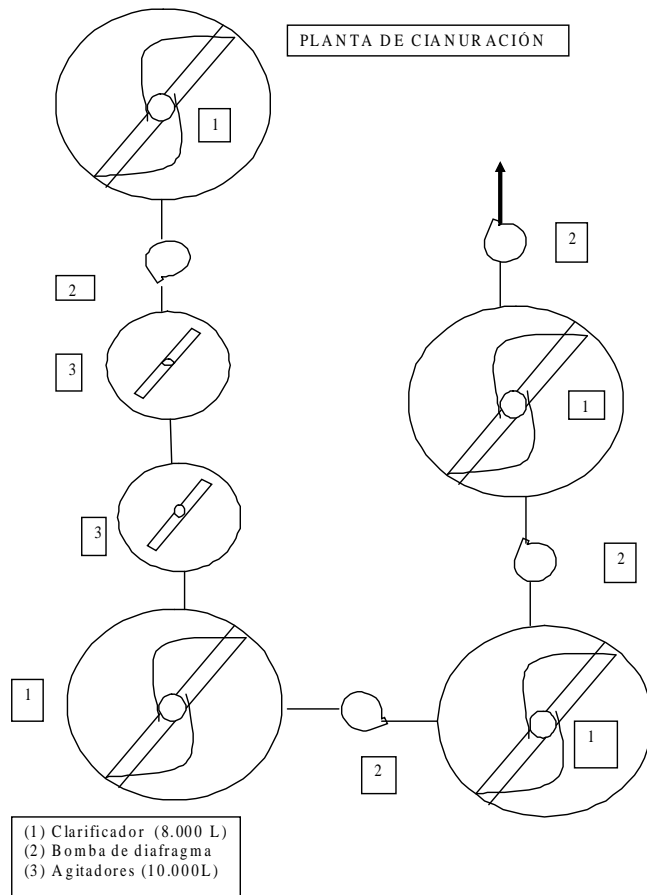


**Figura 31. Diagrama de la planta de beneficio mejorada para la mina el eje.**

Fuente: autor

#### 4.5 SISTEMA DE CIANURACIÓN.

Una vez se identifico las necesidades de la mina se identifico el proceso que garantizara mayor recuperación y menor tiempo de proceso y este es el diseño.



**Figura 32. Planta De Cianuración.**

Fuente: autor

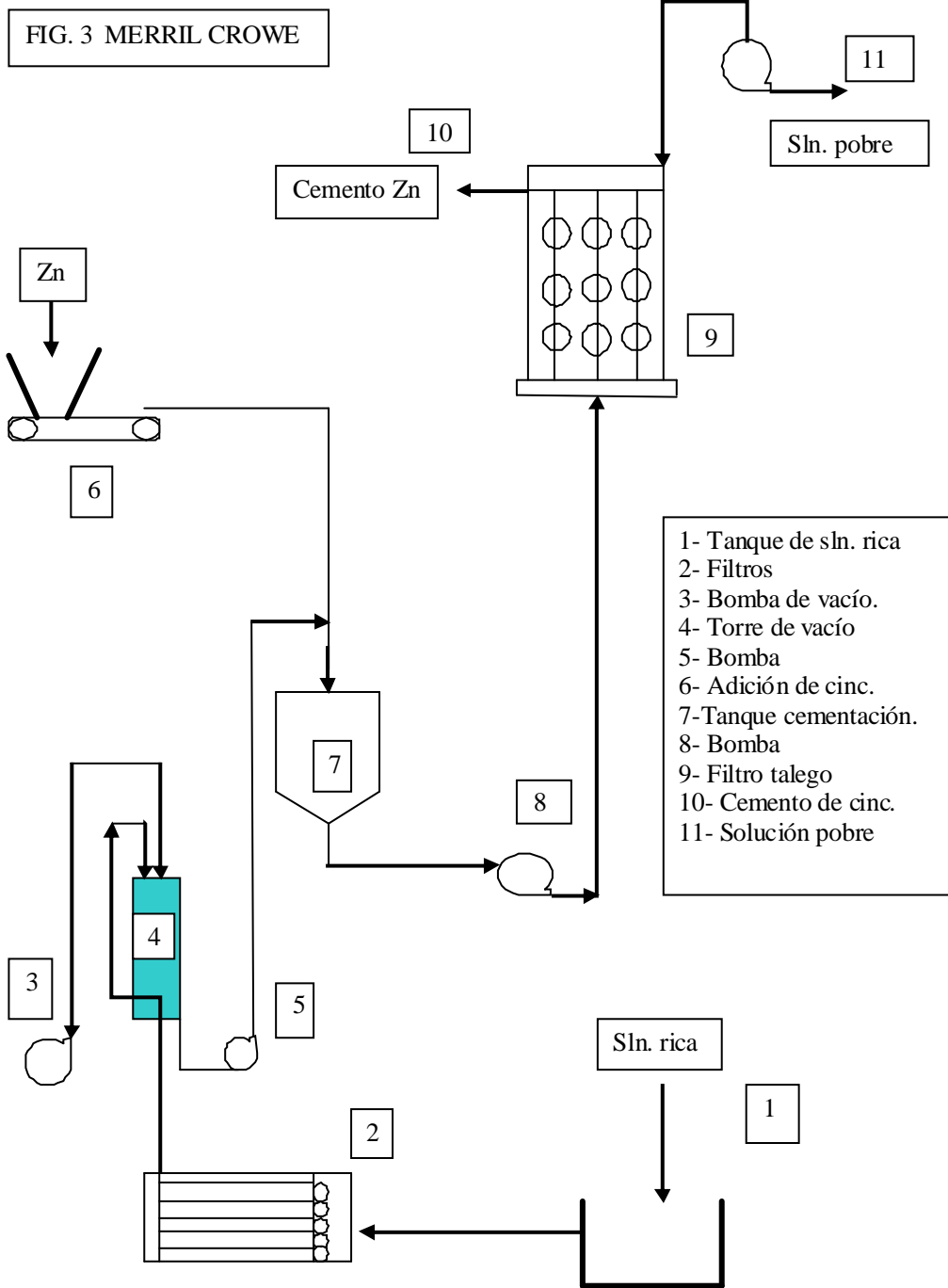


Figura 33. Planta merril crowe.

Fuente: autor

#### **4.5.1 equipos para el montaje de la planta de cianuración.**

- ✓ 4 clarificadores capacidad 8000L
- ✓ 2 agitadores capacidad 10000L
- ✓ 4 bombas diafragma.
- ✓ 2 dosificadores de cianuro.
- ✓ 1 tanque para solución 20000 L
- ✓ Filtros
- ✓ 1 bomba de vacío
- ✓ 1 torre de vacío
- ✓ Sistema dosificador de cinc.
- ✓ 1 tanque de cementación.

## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

Considerados los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas a las muestras entregadas, se hace evidente el siguiente análisis.

### **5.1 Análisis Mineralógico de las muestras recibidas.**

El análisis mineralógico de las muestras a partir del cual se conformo el composito, es muy importante debido a que establece la presencia de los minerales en las muestras, aparte entrega información sobre su morfología, textura y características; de forma tal que se pueda conformar el composito que represente todas las muestras.

En las muestras recibidas se apreciaron dos grupos aquellas asociadas a minerales parcialmente alterados con una significativa presencia de óxidos de hierro y arcillas y otras compuestas de sulfuros poli metálicos, cuarzo y feldespatos aparte de esto fue escasa la presencia de pirita.

Además de los resultados puede extraerse que el oro en las muestras corresponde a oro libre o a oro electrum de tamaño muy fino y asociado en algunos casos a poca pirita presente, preferencialmente se encontraba a óxidos como hematina y goethita, lo cual refleja el carácter de minerales oxidados que conforman el composito. Aunque la presencia de minerales arcillosos es marcada no se evidencio asociación con el oro, pero el problema es que estos minerales pueden actuar como cianicidas por atrapamiento de los minerales arcillosos al oro.

### **5.2 Análisis Lixiviación Diagnostico**

Con el objetivo de corroborar los estudios mineralógicos sobre el tipo y forma presente del oro en las muestras se procedió a realizar una lixiviación diagnostico.

### **5.2.1 Análisis Resultados Lixiviación Diagnostico.**

Al realizar las pruebas de lixiviación diagnostico se pudo apreciar en el numeral 5.4.2 que la mayor porción de oro en los dos frentes es oro libre expuesto, siendo esta porción mayor a la del oro asociado a silicatos y demás tipos de oro; mostrando que son muy pocas las asociaciones de oro a los diferentes minerales de la mena que aparecen en el composito, además que las partículas de oro se encuentran expuestas ala acción del cianuro durante su tratamiento en la lixiviación diagnostico, y puede recoger el grado de liberación requerido para ser tratadas metalúrgicamente, solamente con someter las muestras a reducción de tamaño.

En las muestras los principales minerales a los que se les podía atribuir presencia de oro identificados como minerales de mena corresponden a oro nativo y electrum y porcentajes de oro muy bajo en piritita el cual concuerda con el análisis mineralógico.

Los minerales como óxidos de hierro mostraron una muy poca concentración de oro en los mismos químicamente su asociación era física.

Puede resumirse este análisis afirmando que este tipo de menas se comportaran de forma muy buena ante la acción del cianuro en el proceso de cianuración, siempre y cuando en la reducción de tamaño el proceso de liberación de partículas sea eficiente. Además que se tenga en cuenta los tiempos de proceso para evitar el atrapamiento por los minerales arcillosos.

### **5.3 Análisis De Resultados Del Proceso De Cianuración:**

El análisis de resultados obtenidos en las pruebas de cianuración aplicadas a las muestras tratadas en este estudio se hace teniendo en cuenta los postulados tratados en la tabla 3.

Tomando en cuenta los fundamentos teóricos se puede decir que:

- ✓ Que en las muestras analizadas, se encontró que la mayor disolución de oro en un periodo de tiempo de 24 horas, se presenta en la granulometría correspondiente a – 200 mallas Tyler (75 micras); ese comportamiento se evidencia en las figuras correspondientes al numeral 5.4.3; porcentaje de extracción de oro frente diferentes granulometrías.
- ✓ Aunque esto es lógico pues se estima que a esta granulometría se ha conseguido una liberación casi completa, sin menospreciar los resultados de granulometrías de -100 a 200 mallas pues tienen porcentajes de extracción aceptables.
- ✓ Al observar las curvas de porcentaje de extracción de oro a diferentes granulometrías se puede afirmar que las 24 horas de proceso son un tiempo adecuado debido a que por encima de este tiempo se aumenta el consumo de cianuro sin aumentar e porcentaje de extracción, tal vez debido a los minerales arcillosos presentes en la muestra.
- ✓ El proceso puede disminuir de tiempo pues ya al pasar 16 horas de proceso los valores presentes en las muestras son mínimos.
- ✓ Se puede afirmar que las arenas de la mina el eje son arenas de fácil proceso una vez se haya alcanzado una buena liberación de valores.
- ✓ De la grafica de sedimentación se pudo apreciar que clarificar de esta forma es una pérdida de tiempo valioso.

## CONCLUSIONES.

- ✓ De acuerdo con los resultados de lixiviación diagnóstico realizados al mineral; el estudio presentó una gran facilidad para el proceso de extracción, debido a que la cantidad de elementos cianúricos presentes en la muestra son ínfimas.
- ✓ La mineralogía de las muestras nos presentan un indicativo de los posibles fenómenos que afectan la cianuración en este caso el atrapamiento de oro por parte de minerales arcillosos presentes en las muestras.
- ✓ En el procesamiento del mineral se encontró que la mayor disolución de oro en el periodo de trabajo, se dio a la granulometría de -200 mallas Tyler; pues allí se asume una liberación casi completa y conforme a las características del mineral esta es una condición indispensable para su tratamiento.
- ✓ Se concluye que la lixiviación diagnóstico es una herramienta muy valiosa para la caracterización de un mineral, puesto que permite determinar la asociación entre el oro y minerales que puedan afectar los procesos de extracción y beneficio.
- ✓ Teniendo en cuenta los tenores de las muestras y la facilidad del proceso, es económicamente viable la ampliación del rango de capacidad de la planta a 50 ton día
- ✓ Se concluye que debido a la presencia de minerales arcillosos y con el fin de evitar el atrapamiento del oro por los mismos hay que optar por cortos tiempos de proceso.

- ✓ De las pruebas de sedimentación se establecieron tiempos cortos de residencia en los tanques y agitación fuerte para aumentar el índice de recuperación.
- ✓ Conforme al diseño de la planta mejorada de beneficio se realizó teniendo en cuenta un cambio de condiciones de filón al incluirse celdas de flotación ya que faltó realizar estudios de piques y trincheras.
- ✓ Se concluye que el montaje de la planta Merrill-Crowe es indispensable, teniendo en cuenta en el diseño entregado, basados las características del mineral y necesidades de la planta para un rendimiento óptimo de la planta.

## RECOMENDACIONES

Para que la continuidad de investigación en el área perdure y realizar futuros trabajos en esta línea, se plantean las siguientes recomendaciones.

- ✓ Realizar una investigación para minimizar el efecto de los minerales arcillosos en el proceso de cianuración.
  
- ✓ Formular trabajos similares a este, con minerales auríferos de zonas mineras aledañas de forma que se pueda generalizar el tipo de mineral de la zona.
  
- ✓ Realizar una investigación sobre sistemas mejorados de recirculación de agua proveniente del subsuelo para el uso minero.
  
- ✓ Realizar estudios de viabilidad económica de exportación de arenas con valores insignificantes de oro y plata.

## BIBLIOGRAFÍA.

1. CARDENAS, REVILLA AGUSTIN. Metalurgia Extractiva del Oro. Editorial imprenta FOCET Ltda., Oruro Bolivia 1994.
2. DOMIC M E. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones editorial Andros impresiones Ltda. Chile 2001.
3. BRENT, J. H. Dissolution chemistry of gold and silver in different lixiviants. Mineral processing and extractive metallurgy review. Volumen 4. 1998.
4. ASTM. Standard test method for spectrographic analysis of ores, minerals and rocks by the fire assay preconcentration technique E400-7 (reapproved 1998).
5. LOPEZ M:E. Determinación de oro y plata. Universidad industrial de Santander 1998.
6. RED CYTED, Comité aurífero del Perú, El libro de la minería del oro en América. Editor: José Antonio Espi, España, 2001.
7. KELLY, E. G.& SPOTTISWOOD. Introducción al procesamiento de minerales. Jhon Wiley. USA. 1982.
8. BUSTAMANTE, R. O. Programa modular: Procesamiento de minerales auro-argentíferos. Módulo 6 Concentración de minerales. Convenio CIMEX, MINERALCO, SENA. Colombia, 1992.
9. KAUTZMANN Y MILTZAREK, G. caracterización tecnológica de minerio de riachos machados para fines de lixiviación de oro.

10. Encontró nacional de hidrometalurgia vol II
11. Arias Arce Vladimir. Tecnologías de refinación de los metales preciosos ediciones Grezzley E.I.R.L. lima Perú 1996
12. Peñate Zúñiga Yesid Alberto, desarrollo de correlaciones de mineralogía y extracción de oro en minerales auríferos mediante datos de lixiviación diagnostico. Universidad industrial de Santander, escuela de ingeniería metalúrgica. 2004.



