ACTIVACIÓN CON MOLIENDA MECÁNICA COMO PRETRATAMIENTO EN LA CIANURACIÓN DE MINERALES REFRACTARIOS DE ORO.

OSCAR IVÁN DELGADO RAMÍREZ
ALVARO ALEXIS MENDOZA PRADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2006

ACTIVACIÓN CON MOLIENDA MECÁNICA COMO PRETRATAMIENTO EN LA CIANURACIÓN DE MINERALES REFRACTARIOS DE ORO.

OSCAR IVÁN DELGADO RAMÍREZ
ALVARO ALEXIS MENDOZA PRADA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al Título de Ingeniero Metalúrgico.

Director
GUSTAVO NEIRA
Ingeniero Metalúrgico. Magister. Ph.D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2006

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

A **Dios** en primera instancia, por regalarme ésta vida maravillosa y permitir que haya culminado en feliz termino éste sendero que comencé a transitar hace algunos años.

A mi tío **Herney Delgado** y su señora esposa, **Leonor Gonzáles**, por creer en mí cuando el mundo me mostró su espalda, por mostrarme el camino y ser la luz que iluminó mi vida.

A mis **padres, hermanos, primos** y demás familiares por su apoyo incondicional en ésta ardua tarea.

La Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por brindarme la oportunidad de formarme como un ser integral, fortaleciendo mis conocimientos técnicos pero, principalmente por enseñarme con cada una de las lecciones allí aprendidas .lo que es ser verdaderamente un “ser humano”.

Al Profesor **Gustavo Neira Arenas** por su apoyo invaluable e incondicional, no sólo como docente sino también como un padre, por su colaboración y dirección en éste proyecto de grado.

A **Daniel Garavito, Javier Gaitán, Ambrosio Carrillo** y **Mario Navarrete** y todos mis compañeros por la colaboración prestada para el desarrollo de esta investigación.

OSCAR IVÁN DELGADO RAMÍREZ

Las personas más importantes en mi vida merecen esta dedicatoria, con este trabajo les rindo un homenaje a todo el sacrificio que han hecho para que salga adelante y se cumpla todos mis sueños, dándome el apoyo que siempre necesité. Les doy las gracias por todas las puertas que me ayudaron a abrir.

Mi abuela **Ana Victoria** por todo lo que me enseñó desde que era muy niño y todo el amor que me dio.

Mi mamá **Patricia** por el apoyo y dedicación que tuvo en mi crianza y por dejarme vivir con la confianza que me ha entregado. **MUCHAS GRACIAS.**

Mis hermanos **Carlos y Andrés** por estar a mi lado sufriendo, superándonos y divirtiéndonos. Gracias por hacerme sentir que estoy vivo.

Mis tías **Sara, Negra, Adriana, Mónica, Tina** y mi tío **José** por todo el ánimo y educación que me dieron.

Mis primos y primas por animarme siempre.

Mis amigos por estar a mi lado apoyándome y aconsejándome cuando lo necesitaba. En especial a **Álvaro**, gracias (pinpin lo estimo mucho).

A ti **Mónica** por quererme y darme la fortaleza de superar cualquier inconveniente (Te quiero **Popochita**).

Hay diferentes formas de orar como de ayudar ustedes me han mostrado varias, **GRACIAS.**

ÁLVARO ALEXIS MENDOZA PRADA

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
1.1. MINERALES DE ORO	4
1.1.1 Yacimientos auríferos	4
1.1.2 Mineralogía de las menas auríferas	6
1.1.3 Clasificación de los minerales de oro	6
1.1.4 Minerales refractarios de oro.	12
1.2 PROCESAMIENTO DE MINERALES DE ORO	14
1.3 LIXIVIACIÓN POR CIANURACIÓN.	19
1.4 CIANURACIÓN DE MINERALES DE ORO.	20
1.4.1 Generalidades	20
1.4.2 Cinética de la cianuración del oro.	21
1.4.3 Efecto de las principales variables sobre la cianuración	24
1.4.3.1 Tamaño de partícula	24
1.4.3.2 Concentración de cianuro	24
1.4.3.3 Concentración de oxígeno	25
1.4.3.4 pH	28
1.4.3.5 Temperatura	30
1.4.3.6 Agitación	30
1.5 LIXIVIACIÓN DIAGNÓSTICA DE MENAS AURÍFERAS	30
1.5.1 Generalidades	30
1.6 MOLIENDA MECÁNICA DE ALTA ENERGÍA	32
1.6.1 Generalidades	32
1.6.2 Activación mecánica por la molienda de alta energía	34
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	36

2.1. PLAN DE TRABAJO 36
3. RESULTADOS EXPERIMENTALES 44
3.1 ENSAYO AL FUEGO 44
3.2 MOLIENDA MECÁNICA DE ALTA ENERGIA 45
3.3 LIXIVIACIÓN 53
3.3.1 Lixiviación de diagnóstico del mineral sin molienda mecánica 53
3.3.2 Lixiviación por cianuración 54
3.3.2.1 Ensayo al fuego de las colas de lixiviación de las muestras con y sin molienda 68
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS 69
4.1. MOLIENDA MECÁNICA 69
4.2. LIXIVIACIÓN 71
4.2.1 Análisis de los resultados de la lixiviación de diagnóstico. 71
4.2.1 Análisis de los resultados de las pruebas de cianuración. 71
CONCLUSIONES 75
RECOMENDACIONES 77
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 79
ANEXO A 84
ANEXO B 87
ANEXO C 91
ANEXO D 96

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: Clasificación de los minerales de oro 7

Tabla 2: Procesos de tratamiento de menas de oro. 15

Tabla 3: Influencia de la concentración de cianuro en la disolución de oro 25

Tabla 4: Influencia de la concentración de oxígeno en la cianuración 26

Tabla 5: Influencia de la concentración de álcalis en la cianuración 29

Tabla 6: Resultados obtenidos en el ensayo al fuego 45

Tabla 7: Condiciones de la molienda mecánica de alta energía 46

Tabla 8. Resultados de la lixiviación de diagnóstico. 53

Tabla 9: Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para muestra de mineral sin molienda de alta energía (MAu) 55

Tabla 10: Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral molida por 10 horas sin adición de cal (MN10). 56

Tabla 11: Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral molida por 10 horas con adición de cal (MC10). 58

Tabla 12: Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral molida por 20 horas sin adición de cal (MN20). 59

Tabla 13: Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral molida por 20 horas con adición de cal (MC20). 61

Tabla 14: Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral molida por 40 horas sin adición de cal (MN40). 62

Tabla 15: Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs

Tiempo de lixiviación para la muestra mineral molida por 40 horas con adición de cal (MC40). 64

Tabla 16: Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación para muestras molidas con cal y sin cal y, mineral sin molienda. 66

Tabla 17: Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para muestras molidas con cal y sin cal y, mineral sin molienda. 67

Tabla 18: Resultados del ensayo al fuego a las colas de lixiviación y cálculo del porcentaje de disolución total. 68

Tabla 19: Clasificación de minerales de oro según grado de lixiviabilidad 72

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1: Diferentes tipos de asociación de oro con sulfuros minerales 9
Figura 2: Minerales Refractarios de Oro 13
Figura 3: Disolución Electroquímica de Oro en Soluciones Cianuradas 23
Figura 4: Ensayo de lixiviación diagnóstica a minerales auríferos 31
Figura 5: Tipos de molinos para molienda de alta energía. 33
Figura 6: Colisión bola-polvo-bola en el proceso de molienda 34
Figura 7: Plan de trabajo 36
Figura 8: Metodología experimental 38
Figura 9: Lixiviación de diagnóstico 40
Figura10: Molino Attritor 41
Figura 11: Condiciones de lixiviación 43
Figura 12: Difractógramas de las muestras sin cal con diferentes tiempos de molienda 47
Figura 13. Difractógramas de las muestras con cal con diferentes tiempos de molienda 48
Figura 14. Espectro de Infrarrojo de las muestras con y sin cal molidas por 10 horas, comparadas con la muestra de mineral original. 49
Figura 15. Espectro de Infrarrojo de las muestras con y sin cal molidas por 20 horas, comparadas con la muestra de mineral original. 50
Figura 16. Espectro de Infrarrojo de las muestras con y sin cal molidas por 40 horas, comparadas con la muestra de mineral original. 51
Figura 17. Termogravimetría de las muestras con diferentes tiempos de molienda y el mineral original 52
Figura 18. Resultados de la lixiviación de diagnóstico 54
Figura 19. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra de mineral sin molienda de alta energía (MAu). 55
Figura 20. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra

mineral sin molienda de alta energía (MAu). 56
Figura 21. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 10 horas sin adición de cal (MN10). 57
Figura 22. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 10 horas sin adición de cal (MN10). 57
Figura 23. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 10 horas con adición de cal (MC10). 58
Figura 24. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 10 horas con adición de cal (MC10). 59
Figura 25. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 20 horas sin adición de cal (MN20). 60
Figura 26. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 20 horas sin adición de cal (MN20). 60
Figura 27: Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 20 horas con adición de cal (MC20). 61
Figura 28: Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 20 horas con adición de cal (MC20). 62
Figura 29. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 40 horas sin adición de cal (MN40). 63
Figura 30. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 40 horas sin adición de cal (MN40). 63
Figura 31. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra mineral moliendo por 40 horas con adición de cal (MC40). 64
Figura 32. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para la muestra

mineral moliendo por 40 horas con adición de cal (MC40). 65
Figura 33. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación. 66
Figura 34. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. 67

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia de la activación por molienda mecánica de alta energía como pre-tratamiento del mineral refractario de la mina “Reina de Oro” sobre la cianuración de este mineral.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las causas principales de la refractariedad del mineral de la mina “Reina de Oro” mediante análisis químico, mineralógico y lixiviación de diagnóstico.

- Determinar el efecto de la molienda mecánica de alta energía sobre la disolución de oro.

- Identificar los cambios mineralógicos y físico-químicos ocasionados por la molienda de alta energía del mineral que puedan tener influencia sobre la lixiviación.

RESUMEN

TITULO: ACTIVACIÓN CON MOLIENDA MECÁNICA COMO PRETRATAMIENTO EN LA CIANURACIÓN DE MINERALES REFRACTARIOS DE ORO.*

OSCAR IVÁN DELGADO RAMÍREZ.
ALVAR ALEXIS MENDOZA PRADA.**

PALABRAS CLAVE: Molienda de alta energía, activación mecánica, lixiviación de diagnóstico, minerales refractarios de oro.

Muestras de mineral refractario de oro concentrado (36g Au/Ton mineral) fueron sometidas a activación mecánica por varios tiempos (10, 20, y 40 horas) y diferente pH en un molino Attritor, y lixiviadas durante 48 horas mediante cianuración convencional con agitación constante, tomándose alícuotas a través del tiempo. Las soluciones de lixiviación fueron analizadas para la determinación de oro mediante espectrofotometría de absorción atómica. Adicionalmente, se aplicó difracción de rayos X, espectroscopia de infrarrojo, termogravimetría y análisis por fotosedimentación a los sólidos antes y después de la molienda para determinar los efectos de ésta sobre el mineral.

Mediante los resultados se comprobó que la molienda mecánica de alta energía del mineral aumenta significativamente la disolución de oro, debido muy posiblemente al aumento de la reactividad química. Se encontró que después de una molienda de 10 horas, con adición de cal y 48 horas de lixiviación, el 69,85 de oro fue disuelto, lo cual representa un aumento en su disolución de aproximadamente del 30% con relación al mineral sin molienda mecánica. Tiempos de molienda superiores a 10 horas no mostraron un aumento efectivo de la disolución debido probablemente a algunas posibles transformaciones de las especies minerales, liberación de elementos cianicidas, transformación o pasivación de los minerales contenedores de oro, efectos granulométricos y/o cambios en su comportamiento a la lixiviación.

Así mismo, los análisis de DRX, IR, termogravimetría y fotosedimentación, evidenciaron importantes efectos de la molienda mecánica, tales como la disminución progresiva del tamaño de partícula y la amorfización, inducción de transformaciones, desaparición de fases y distorsión de las redes cristalinas, entre otros.

---

*Investigación
** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Ph.D. Gustavo Neira Arenas

ABSTRACT

TITLE: MECHANICAL MILLING ACTIVATION AS A PRE-TREATMENT FOR THE CYANADATION OF REFRACTORY GOLD ORE *

OSCAR IVÁN DELGADO RAMÍREZ.
ALVARO ALEXIS MENDOZA PRADA.**

KEYWORDS: High energy ball milling, mechanical activation, diagnostic leaching, refractory gold ore

Concentrate refractory gold ore samples (36 g Au/Ton) were mechanically activated by milling in a attritor mill for different periods of time (10, 20 and 40 hours) and pH, and then leached for 48 hours by conventional leaching at constant stirring, taking aliquots along time. The leaching solutions were analyzed for gold by Atomic Absorption Spectrophotometry. Additionally, the solid particles before and after milling were examined by XRD, IR analysis, Thermogravimetry and Photosettling analysis, to determine the effects of activation on the ore.

The results showed that high energy mechanicall milling of the ore increases significantly the dissolution of gold, probably due to the increase in chemical reactivity. It was found that after 10 hours milling, in the presence of lime and 48 hours leaching, 69,85% of gold was dissolved, which represents an increase of approximately 30% in comparison to the ore without milling. Periods of time higher than 10 hours milling did not show effective increases in gold dissolution, probably due to some possible transformations of mineral species, release of cyanide-consuming elements, transformation or pasivación of gold-containing minerals, granulometric effects and/or changes of behaviour during leaching.

Moreover, the results of XRD, IR, TG and Photosetting analysis showed important effects of the milling, such as gradual decrease of particle size, amorphization, induced transformation, phase disappearance and lattice distorsion, amongst others.

---

*Research

** Faculty of Phisic-Chemistrys. Engineering. School of Metallurgycal Engineering and Materials science.
Ph.D. Gustavo Neira Arenas
Physic-Chemistry Engineering.

INTRODUCCIÓN

Aunque Colombia no se ha distinguido por ser un país donde se haya generado un impulso enérgico al avance de la minería, cabe anotar que en muchas regiones de nuestro país esta actividad es factor fundamental de desarrollo en el ámbito social, económico y cultural de las mismas. De esta manera, la minería colombiana se ha caracterizado por ser de tipo pequeña y artesanal, en la cual se explotan diferentes minerales de oro. Una gran cantidad de estos minerales son del tipo refractario, en los cuales los valores de oro se encuentran combinados ó inmersos en una matriz mineral, muchas veces piritosa, la cual puede contener especies cianicidas que consumen altas cantidades de reactivos, o que pueden impedir un contacto efectivo del cianuro con el metal precioso. En estas condiciones se obtienen resultados muy pobres en la extracción del Oro y, en algunos casos, el proceso mismo se hace antieconómico. Por otra parte, el procesamiento de este tipo de minerales siempre conlleva un alto riesgo de contaminación del ambiente no solo por el uso indiscriminado de cianuro en exceso sino por la posible disolución de otros minerales que generan altas concentraciones de elementos potencialmente nocivos para la biota y los seres humanos.

Para el tratamiento de los minerales refractarios de oro se han desarrollado procesos tales como oxidación con agentes químicos, tostación, electrooxidación y agentes biológicos con el fin de facilitar el contacto efectivo del cianuro con el metal precioso. Estos métodos, sin embargo, presentan problemas como emisiones al medio ambiente, largos períodos de tratamiento, altos costos de operación, entre muchos otros, que han dificultado su aplicación en la minería colombiana. También se han desarrollado métodos basados en reactivos diferentes al cianuro que, no obstante su efectividad, no han logrado superar las barreras impuestas por su costos, disponibilidad, y el tradicional arraigo cultural del cianuro. Por lo tanto, nuevos aportes siempre serán bienvenidos pues éstos presentarán otras alternativas que podrán facilitar su directa aplicación.

Bajo las premisas anteriores podemos identificar uno de los grandes problemas que afrontan muchas de las zonas mineras de nuestro país, que disponen de yacimientos de oro de éstas características y, así mismo reconocer la gran responsabilidad de los entes universitarios y de investigación en la búsqueda de posibles soluciones a este tipo de problemas y, que constituyan un aporte al desarrollo social, económico y cultural del país.

Teniendo en cuenta la importancia que reviste para el país el desarrollo de nuevos métodos que permitan sortear las actuales dificultades presentes en la minería y, que a su vez conlleven al fortalecimiento y tecnificación de ésta industria, se ha ejecutado este proyecto que estudia un proceso alternativo para el tratamiento de minerales refractarios de oro. Este proceso alternativo se denomina “molienda mecánica de alta energía”, el cual se aplica con el propósito de aumentar la reactividad química del sólido antes de realizar la lixiviación con cianuro del mineral refractario de oro. El aumento de la reactividad química de los sólidos está asociado directamente con el acrecentamiento del área superficial del mineral, la disminución del tamaño de grano, y la inducción de defectos en la estructura cristalina como consecuencia del tratamiento mecánico.

Es importante mencionar que en ésta investigación, para el mejor entendimiento de las causas de la refractariedad del mineral, se aplicó un concepto relativamente nuevo en materia de minería como es el de la lixiviación de diagnóstico. En este ensayo, se somete la muestra problema a una disolución selectiva (cianuración – ataque ácido), con variados reactivos escogidos de acuerdo con los diferentes tipos de minerales identificados en la mena y que permiten identificar el grado de asociación o de permanencia de oro en éstos compuestos, por ejemplo: oro libre, oro asociado a pirita, oro asociado a carbonatos, etc.

Los resultados obtenidos en ésta investigación permitieron establecer las causas de la refractariedad de la muestra estudiada, procedente de la región de vetas (Santander), así como evaluar la influencia de la molienda mecánica de alta energía sobre el nivel de refractariedad del mineral y su posterior cianuración.

Además de las conclusiones obtenidas en relación con las causas de la refractariedad y la influencia de la molienda mecánica, también se determinaron las condiciones óptimas de molienda (tiempo y pH), que permiten lograr la liberación de las partículas de oro asociadas a los diferentes minerales y, por lo tanto, una mayor lixiviabilidad, que se vio reflejada en el aumento del porcentaje de extracción de oro de la mena.

Con los resultados presentados en este trabajo, se desea contribuir significativamente en el mejoramiento de los procesos de beneficio de minerales auríferos y, por consiguiente en el avance nacional hacia una minería tecnificada que permita la generación de valor agregado y, a su vez contribuya en el mejoramiento de la calidad de vida en las regiones mineras.

1. FUNDAMENTOS TEORICOS.

1.1 MINERALES DE ORO[1]

El oro se encuentra en la naturaleza como metal en estado libre o combinado. Las fuentes de las cuales se extrae el oro, se pueden dividir en tres clases: las Vetas y filones, los placeres fluviales y la obtención del oro como subproducto.

Las Vetas y filones, se encuentran en las rocas antiguas y volcánicas de edad terciaria, donde el oro se encuentra en forma nativa asociado al cuarzo, pirita, arsenopirita, plata nativa, óxidos y a sulfuros metálicos.

Los placeres formados por areniscas y gravas no consolidadas o semiconsolidadas, contienen muy pequeñas cantidades de oro nativo y otros metales pesados. La mayor parte son depósitos fluviales y glaciales que ocurren a lo largo de los valles y cauces de los ríos, y terrazas de ríos preexistentes.

El oro como subproducto en las menas de metales base puede ser recuperado durante el proceso de fundición seguido de una refinación electrolítica. Como ejemplo se puede citar el procesamiento del cobre, del plomo, etc.; en los cuales, los metales preciosos se concentran en los residuos anódicos, comúnmente llamados lodos anódicos.

1.1.1 Yacimientos auríferos [2]. Los yacimientos de oro se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Segregaciones magmáticas: formadas por la consolidación de magmas fundidos.

- Pegmatitas: formadas por soluciones ígneos-acuosas resultantes de la diferenciación magmática.

- Depósitos pirometasomáticos: formados a temperaturas y presiones altas en las rocas invadidas, cerca de los contactos de intrusivos ígneos, por fluidos térmicos que emanan de las rocas invasoras.

- Depósitos hipotermales: son filones y depósitos formados por fluidos térmicos a grandes profundidades a temperaturas y presiones altas.

- Depósitos mesotermales: filones y depósitos formados por fluidos térmicos a poca profundidad, a temperaturas y presiones medias.

- Depósitos epitermales: filones y depósitos formados por fluidos térmicos a poca profundidad, a temperaturas y presiones relativamente bajas.

- Depósitos originados por soluciones frías: formados por aguas de origen atmosférico que corren por el suelo y disuelven a su paso los metales de las rocas para su precipitación ulterior.

- Depósitos sedimentarios. Formados por procesos de degradación. Estos se refieren a los placeres de oro.

El oro está distribuido ampliamente en la corteza terrestre y los océanos, pero rara vez se presenta en grandes concentraciones que permitan una recuperación económica.

1.1.2 Mineralogía de las menas auríferas [2]. Desde el punto de vista de la cianuración, las menas de oro generalmente se clasifican en los siguientes grupos:

- Menas de óxidos simples que contienen partículas finas de oro nativo, ya sea en cuarzo o ganga de piedra caliza.

- Menas de sulfuros simples en las que el oro está asociado con pequeñas cantidades de pirita y arsenopirita.

- Material aluvial o placer.

- Menas complejas de metales comunes en las que los metales preciosos son constituyentes importantes desde el punto de vista económico.

- Menas complejas refractarias en las que las especies minerales que contienen oro no son prontamente solubles en cianuro.

- Menas de metales comunes donde los metales preciosos son de menor valor y son subproductos resultantes del procesamiento metalúrgico.

1.1.3 Clasificación de los minerales de oro [3]. Los minerales dentro del grupo de un metal, suelen clasificarse por su abundancia en la naturaleza, por su composición mineralógica o por su proceso de tratamiento.

Para el caso de los minerales de oro, la clasificación mas común se basa en la estrecha relación existente entre mineralogía y proceso de tratamiento. La Tabla 1, presenta una forma de clasificación de los minerales de oro.

Tabla 1: clasificación de los minerales de oro.

1. **ORO LIBRE**
2. **ORO COMBINADO**
3. **ORO ASOCIADO**
    - **Sulfuros de hierro (pirita, marcasita y pirrotita)**
    - **Sulfuros de arsénico y antimonio (arsenopirita y estibinita)**
    - **Sulfuros de cobre (principalmente calcopirita)**
    - **Otros sulfuros (galena y blenda) y sulfosales**
    - **Óxidos de hierro**
    - **Minerales de uranio**
    - **Minerales carbonáceos y grafíticos**
    - **Silicatos y carbonatos**
    - **Minerales micáceos**
    - **Minerales de manganeso**

NOTA: La amplia gama puede abarcar combinaciones de uno o de los minerales citados

Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 154

El oro puede también presentarse en una serie de asociaciones complejas que requieren pretratamiento de estos minerales, generalmente por procesos oxidantes debido a que el tratamiento directo de cianuración es ineficiente o antieconómico. Las principales asociaciones suceden cuando el oro se encuentra ligado a sulfuros, minerales consumidores de reactivos (pirrotita, arsenopirita, etc.), minerales carbonáceos o combinaciones de los anteriores.

Se define, como “oro libre” a las partículas de oro que pueden ser liberadas totalmente de la mena mediante molienda; “oro asociado” a las partículas de oro que están unidas a los límites de grano después de molienda, pero quedan

expuestas a la acción de los reactivos (cianuro); “oro ocluido o encapsulado”, aquel en el cual las partículas de oro están completamente encerradas dentro de las partículas minerales, y como “oro submicroscópico o diseminado” a las partículas que están incluidas en sulfuros, diseminadas en la matriz o están por debajo de los límites de detección de la microscopía óptica. Una ilustración gráfica de estos conceptos, se muestra en la Figura 1.

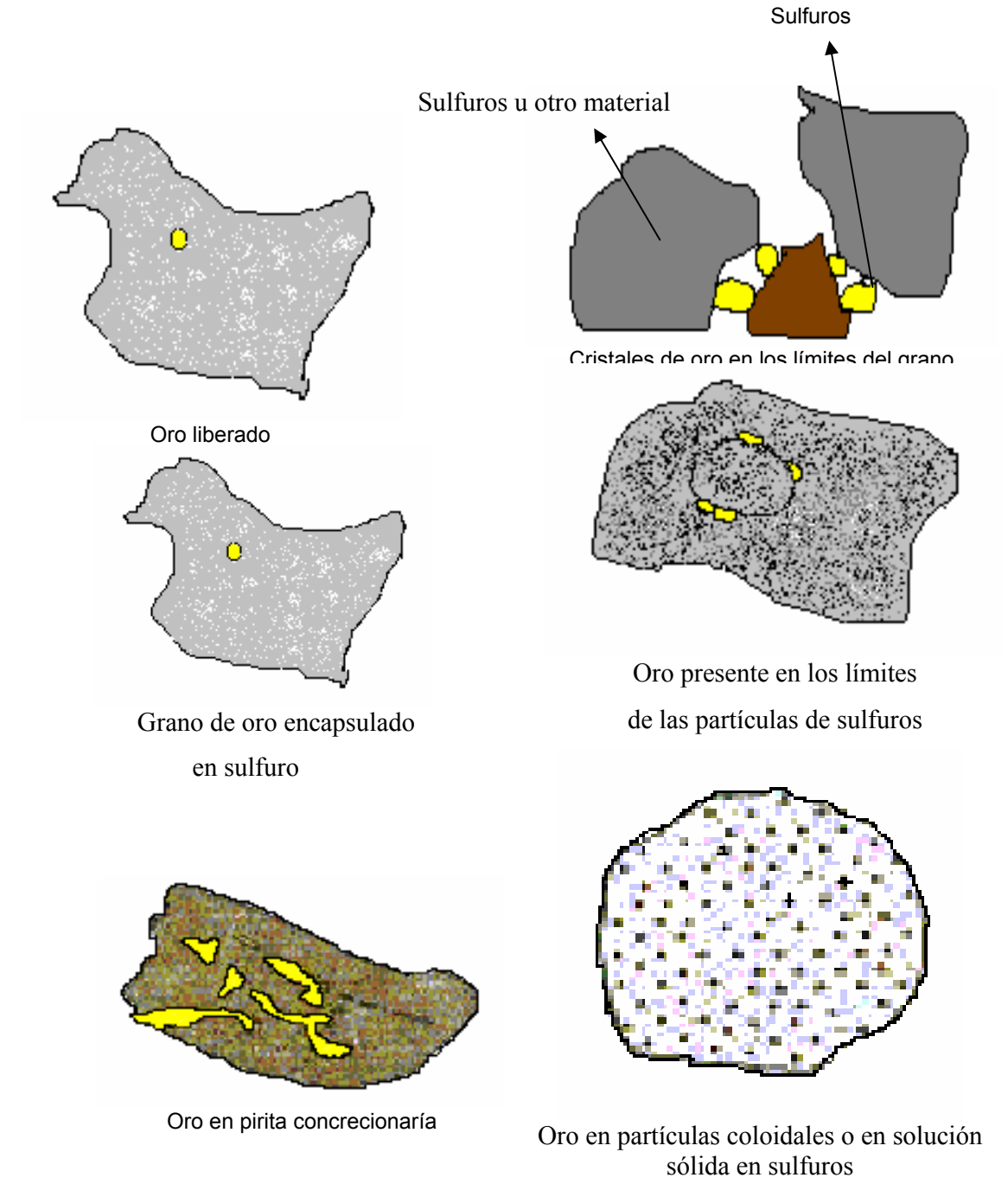
El oro en los minerales, se presenta, entonces, en diferentes formas que se describen a continuación:

Una de las formas comunes de encontrar el oro en la naturaleza es como oro libre o nativo, variando su pureza y granulometría desde centímetros hasta micras. El oro fino se encuentra en yacimientos tipo sedimentario, pero muy frecuentemente en yacimientos hidrotermales, por ejemplo epitermales.

Algunas veces, el oro se encuentra aleado con plata (15 – 35 % Ag), aleación que se conoce como oro argentífero o “electrum” y en raras ocasiones aleado con mercurio formando amalgama (Au_2Hg_3).

Otra de las formas de encontrar oro es como trazas en el carbón, agua de mar y en cenizas de materias vegetales y animales.

Con respecto al oro combinado, las principales especies son los teluros que contienen pequeñas cantidades de otros elementos como antimonio, plomo y mercurio. Estos compuestos son difíciles de cianurar y requieren pretratamientos, dando lugar procesos especiales. Entre estos compuestos están la: calaverita, krenesita, silvanita, petzita y hesita (Ag_2Te con hasta 4,7 % de Au).



Fuente: López, María esperanza. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de minerales auroargentiferos. Tesis de maestría en ingeniería metalúrgica, UIS, 1999. Bucaramanga.

Figura 1. Diferentes tipos de asociación de oro con sulfuros minerales

El oro se puede encontrar también asociado con una variedad de minerales

- Sulfuros de hierro: La pirita es el mineral más común que puede llevar el oro asociado. Dependiendo de las condiciones de formación del yacimiento, este oro puede ser liberado por molienda más o menos fina, o estar diseminado como inclusiones en el tamaño de micras, haciendo al mineral refractario a los procesos de tratamiento normales. De gran importancia es el contenido de azufre, el cual aumenta la dificultad de tratamiento con su incremento pudiendo estar asociado el oro a la pirita y/o a la ganga.

  Un caso particular es el de la pirrotita, $Fe_{1-x}S$ (x entre 0 y 2), que requiere un tratamiento previo de oxidación y posterior cianuración,

- Sulfuros de arsénico y antimonio: Normalmente se presentan como especies mixtas de pirita y arsenopirita, donde el oro esta asociado a los granos de sulfuro de forma finísima, a veces menor a una micra, imposible de detectar por los métodos normales de microscopía.

- Sulfuros de cobre: En la mayoría de yacimientos, la calcopirita se encuentra asociada con mayor o menor contenido de pirita, y el oro, muy fino, puede estar bordeando o algunas veces incluido en ambas especies. Muchos de los yacimientos de sulfuros de cobre contienen pequeñas cantidades de oro en el orden de partes por millón (ppm).

- Otros sulfuros: Algunos de los otros sulfuros con los cuales el oro puede estar asociado son galena, blenda, calcosita, covelina y niquelito.

- Óxidos de hierro: La magnetita y otros óxidos de hierro secundarios (hematita, goethita, limonita y jarosita) pueden llevar asociaciones de oro. En el caso de óxidos secundarios es normal que el oro se encuentre finamente diseminado

(en micras) y recubierto por finas partículas de arcillas y lamas naturales. En el tratamiento de estos minerales, las pérdidas de metal pueden ser debidas más al recubrimiento de las partículas por material arcilloso que a su grado de liberación.

- Minerales de uranio: Este tipo de asociaciones entre el oro y los minerales de uranio es frecuente en Sudáfrica. Generalmente, los granos de oro son muy finos y ocluidos en el mineral (uraninita) y en la ganga silícea, aunque algunas veces pueden ocurrir asociaciones más complejas.

- Minerales carbonáceos y grafíticos: Se conoce como materiales carbonáceos, aquellas menas que contienen carbono, carbón activado o carbón en forma de grafito, o compuestos de cadena larga como los ácidos húmicos. La dificultad en el tratamiento de estas menas está en la adsorción del oro disuelto por el material carbonáceo, originando una precipitación prematura y pérdidas en el proceso de lixiviación.

- Silicatos y carbonatos: En estos minerales el oro puede estar ocluido o bordeando los granos. La presencia de sulfuros es escasa y por esta razón, aunque el oro se encuentre finamente diseminado, se obtienen buenas recuperaciones por lixiviación convencional. Otro caso es el de oro en rocas de tipo magmático epitermales, donde el oro puede estar encapsulado en la sílice y dificultar su extracción.

Otra forma de clasificación de los minerales de oro es aquella basada en su refractariedad o baja extracción de oro de sus minerales mediante métodos convencionales, como la concentración gravimétrica o la cianuración.

1.1.4 Minerales refractarios de oro. En algunos casos es relativamente fácil extraer el oro presente en un mineral, por métodos convencionales como la cianuración. En otros, sin embargo, los resultados son muy pobres. Algunos de éstos minerales pueden presentar serios inconvenientes durante el tratamiento o beneficio metalúrgico, los cuales pueden ser [4]:

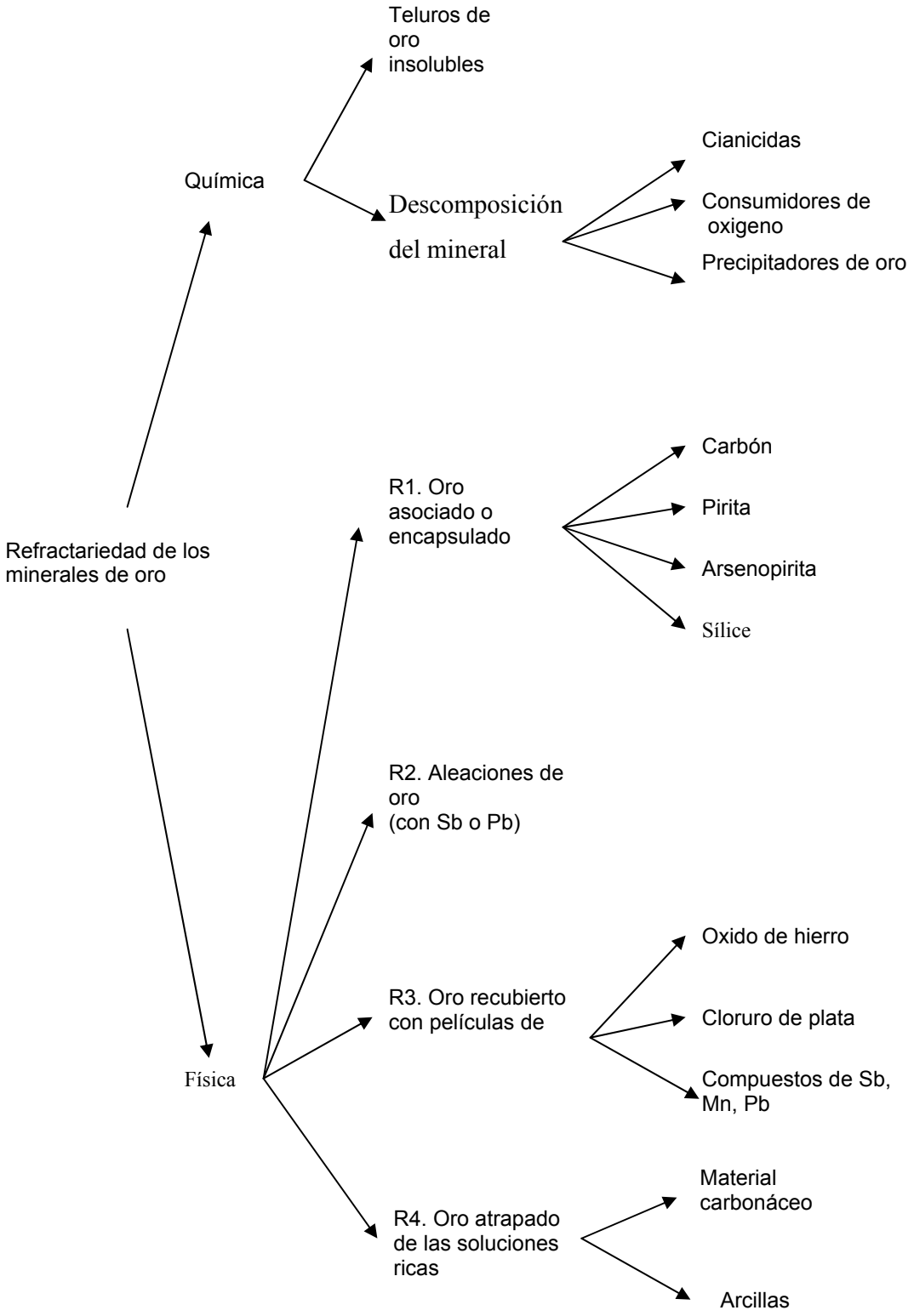
- ✓ Poca o nula permeabilidad del pad o pila debido a la presencia de abundante material fino menor a 20 mallas en la forma de arcillas, limonitas, etc.

- ✓ Presencia de elementos o compuestos cianicidas: As, Sb, Hg, CuO, carbón, teluros, aguas ácidas, etc, originando fuertes consumos de cianuro y cal.

- ✓ Intercrecimientos mineralógicos de oro y plata en tamaños atómicos o sub-atómicos, que impiden exponer las partículas valiosas a la solución lixiviante.

Los dos últimos casos requieren especial atención, ya que estos corresponden a los denominados “minerales refractarios de oro” que son aquellos minerales que no responden adecuadamente al método de cianuración directa.

Esta clasificación se representa en la figura 2, donde una mayor refractariedad o impedimento para extraer oro por cianuración total corresponde a aquellas asociaciones designadas por R1, mientras una menor refractariedad corresponde a R4.



Fuente: López, María esperanza. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de minerales auroargentiferos. Tesis de maestría en ingeniería metalúrgica, UIS, 1999. Bucaramanga.

Figura 2. Minerales Refractarios de Oro

1.2 PROCESAMIENTO DE MINERALES DE ORO

El oro puede extraerse de los placeres recurriendo a la concentración gravimétrica, debido a la diferencia del peso específico del oro y de la ganga.
El oro que se encuentra en combinación química o dispersado en un grano más fino en la mena, no puede recuperarse con facilidad. Este metal suele encontrarse en combinación con la plata, pero en aquellas menas en las que Figura como metal principal, puede recuperarse por uno de los siguientes procesos [2]:

- Amalgamación.

- Cloruración.

- Cianuración.

- Combinaciones de amalgamación, concentración gravimétrica, flotación, tostación y cianuración.

- Fundición con menas de plomo o cobre.

En general, el conocimiento mineralógico de las menas, sus características físicas, el grado de liberación del oro y la evaluación de las reservas del yacimiento son los principales factores que definen el proceso de tratamiento que se ha de seguir en la recuperación de la mena, también son de importancia las condiciones de la localidad de explotación y las características medioambientales.

En la Tabla 2 se presenta el procedimiento aplicable de acuerdo con cada tipo de mineral. Según esta clasificación el procedimiento puede ser:

- Oro libre (menas del grupo 1): Normalmente se emplea concentración gravimétrica o amalgamación (oro grueso) o la cianuración (oro fino).

- Menas no refractarias o fácilmente lixiviables (menas del grupo 1 y algunas del grupo 3): El proceso principal para este tipo de menas es la lixiviación con cianuro.

Tabla 2: procesos de tratamiento de menas de oro.

Tipo de mena aurífera	Procesos
1. Oro libre • Aluviones, eluviones, fluviales • Otras menas	• Concentración gravimétrica – Amalgamación – Cianuración residuos (oro fino). • Idem • Concentración gravimétrica – Amalgamación – Flotación - Cianuración residuos (oro fino).
2. Oro combinado • Teluros	• Flotación oxidación (tostación) concentrados-cianuración cianuración (residuos). • Cianuración directa Tratamientos de residuos por SO_2 Flotación-tostación concentrados-cianuración.
3. Oro asociado • Pirita y Marcasita	• Concentración gravimétrica (del oro y/o sulfuros si están

• Pirrotina • Arsenopirita • Minerales complejos de cobre (principalmente con calcopirita)	liberados). • Flotación-Fusión de concentrados(oro en sulfuros). • Flotación-Cianuración residuos(oro en ganga). • Flotación-Concentrados con o sin tostación cianuración residuos(oro en sulfuros y gangas). • Flotación-Concentrados auríferos (para la venta)-cianuración residuos. • Cianuración-Flotación residuos recianuración concentrado con o sin tostación. • Cianuración (preaireación y baja alcalinidad). • Cianuración-flotación residuos-recianuración concentrados con o sin tostación. • Flotación-tostación concentrados-cianuración, cianuración residuos flotación. • Flotación concentrados auríferos (para venta), cianuración, cianuración residuos flotación.

• Minerales complejos Plomo - Zinc (Igual a minerales complejos de cobre) • Óxidos de hierro • Minerales de uranio • Minerales carbonaceos y grafiticos • Silicatos, carbonatos (minerales sedimentarios con oro fino y pocos sulfuros).	• tostación-cianuración. • Cianuración directa • Flotación-fusión concentrados de cobre (oro en lodos electrolíticos). • Flotación diferencial Cu-Mo-cianuración concentrado de Mo • Flotación-fusión concentrados de cobre (oro en sulfuros). • Cianuración residuos de flotación (oro en ganga). • Gravimetría-amalgamación (si el oro se libera por conminución). • Conminución-cianuración directa • Flotación-lixiviación acida, concentrado (extracción de uranio). tostación del concentrado-cianuración. • Calcinación-cianuración • Oxidación química-cianuración

	• Pasivación superficie material carbonáceo (reactivos específicos)-cianuración • Flotación-oxidación concentrado-cianuración (si el oro esta solo en material carbonáceo). • Conminución-cianuración

Fuente: Instituto tecnológico geominero de España. Minería química. 1991. Pg: 160-161

Menas refractarias no fácilmente lixiviables: (menas del grupo 2 y 3). Requieren procesos previos de pretratamiento y/o métodos específicos de solubilización del oro. Ejemplos típicos de estos son los teluros, minerales sulfurosos y minerales carbonáceos.

Con respecto a la recuperación del oro de las soluciones cuando ya se ha realizado la cianuración, hay dos tipos de procesos industriales muy empleados:

- Merril – Crowe por cementación con zinc.

- Adsorción con carbón activado, mediante carbón en pulpa (CIP), carbón en lixiviación (CIL) o carbón en lixiviación con oxígeno (CILO). Estos dos últimos incluyen lixiviación y adsorción.

El proceso Merril – Crowe requiere una posterior purificación del precipitado de oro para obtener el metal en barra (bullión). El proceso con carbón activado, requiere una desorción del carbón y posterior electrólisis de la solución.

1.3 LIXIVIACIÓN POR CIANURACIÓN.

La lixiviación es un proceso químico metalúrgico mediante el cual se extrae un metal contenido en un sólido, ya sea de un mineral o de otro material, mediante su disolución en una solución acuosa.

La disolución del sólido generalmente es parcial, y solo en casos muy particulares es total, quedando al final un residuo sólido que normalmente se le conoce como colas de lixiviación.

La lixiviación se realiza en tres (3) etapas:

i. Disolución del metal.
ii. Separación sólido – líquido.
iii. Lavado de colas.

En la etapa de disolución se lleva a cabo la solubilización del metal de interés en una solución acuosa, por intermedio de un agente o reactivo lixiviante específico, que es el encargado de reaccionar con el material a disolver, llevando al metal a una forma soluble.

Posterior a la etapa de disolución se lleva a cabo la separación sólido-líquido, que consiste en separar la solución rica de los residuos sólidos, puede ser mediante el simple escurrimiento o drenaje del líquido, así como también utilizando el espesamiento y/o la filtración, según el método de lixiviación utilizado.

Finalmente es necesario realizar el lavado de las colas con el propósito de recuperar la mayor parte de la solución que ha quedado como humedad empapando los residuos sólidos, la cual contiene metal ya disuelto y lixiviante remanente.

La lixiviación por cianuración es un tipo de lixiviación que cumple los anteriores parámetros descritos y en la cual se usa como agente lixiviante soluciones de cianuro.

1.4 CIANURACIÓN DE MINERALES DE ORO.

1.4.1 Generalidades. En la mayoría de los minerales de oro, este elemento se encuentra en forma metálica y debe ser oxidado durante el proceso de disolución. Las reacciones que tienen lugar durante la disolución del oro en las soluciones de cianuro bajo condiciones normales, ya han sido establecidas. La mayoría de las autoridades en la materia concuerdan en que la ecuación global de la disolución de oro es la siguiente [2]:

$$2Au + 4\mathbf{NaCN} + O_2 + 2H_2O = 2Au(CN)_2^- + H_2O_2 + 4Na^+ + 2OH^-$$

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 la cal se utiliza para controlar la alcalinidad.

En un sistema relativamente simple de este tipo, el oro se disuelve con facilidad y las únicas condiciones que se requieren son: que el oro esté libre y limpio; que la solución de cianuro no contenga impurezas que puedan inhibir la reacción y que se mantenga un adecuado abastecimiento de oxígeno a la solución durante todo el proceso de la reacción.

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 sino que además pueden inhibir el proceso. Un ejemplo de ello son los minerales refractarios de oro, los cuales presentan un

variado conjunto de problemas químicos, los cuales dificultan la aplicación de la lixiviación por cianuración como método efectivo en la extracción del oro.

1.4.2 Cinética de la cianuración del oro. 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 cinética, 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 auroso que causa pasivación de las partículas.

Para poder explicar la cinética de disolución de oro en soluciones acuosas cianuradas, existen tres ecuaciones clásicas; estas son [3]:

- Ecuación de Elsner (1846):

  $4Au + 8Na(CN) + O_2 + 2H_2O = 4NaAu(CN)_2 + 4Na(OH)$
- Ecuación de Janin (1892):

  $2Au + 4Na(CN) + 2H_2O = 2NaAu(CN)_2 + 2Na(OH) + H_2$ (gas)
- Ecuación de Bodlaender (1896):

  $2Au + 4Na(CN) + O_2 + 2H_2O$ Ó $2NaAu(CN)_2 + 2Na(OH) + H_2O_2$

  el peróxido de hidrógeno, vuelve a reaccionar:

  $H_2O_2 + 2Au + 4Na(CN) = 2NaAu(CN)_2 + 2Na(OH)$

Esta última ecuación es similar a la ecuación de Elsner, donde el peróxido de hidrógeno desaparece en un balance total.

En 1934, Barsky, Swaison y Hedley, determinaron las energías de formación de los complejos aurocianurados, obteniéndose estos resultados [2]:
Elsner: -90 Kcal/mol
Janin: +13.5 Kcal/mol
Bodlaender: -22.5 Kcal/mol

Según estos resultados, la ecuación de Elsner es la que mejor describe la disolución del oro mediante cianuración, por tener mayor cambio de energía libre negativa. Se demostró que esta reacción sucede hasta que todo el cianuro se ha consumido o todo el metal se ha disuelto.

Con el paso del tiempo y de forma muy gradual, se ha establecido que la lixiviación de oro es básicamente un proceso de corrosión electroquímico, con la velocidad controlada por difusión del cianuro (CN^-) y oxígeno (O_2) o por la reducción del oxígeno sobre el mineral. Hacia 1980, Nicol demostró que en el proceso, el mineral presenta dos áreas adyacentes: catódica y anódica, con el siguiente mecanismo de lixiviación:

Anódica: $2Au + 4CN^- = 2Au(CN)_2^- + 2e^-$

Catódica: $O_2 + 2H_2O + 2e^- = H_2O_2 + 2OH^-$

$H_2O + 2OH^- + 2e^- = 4OH^-$

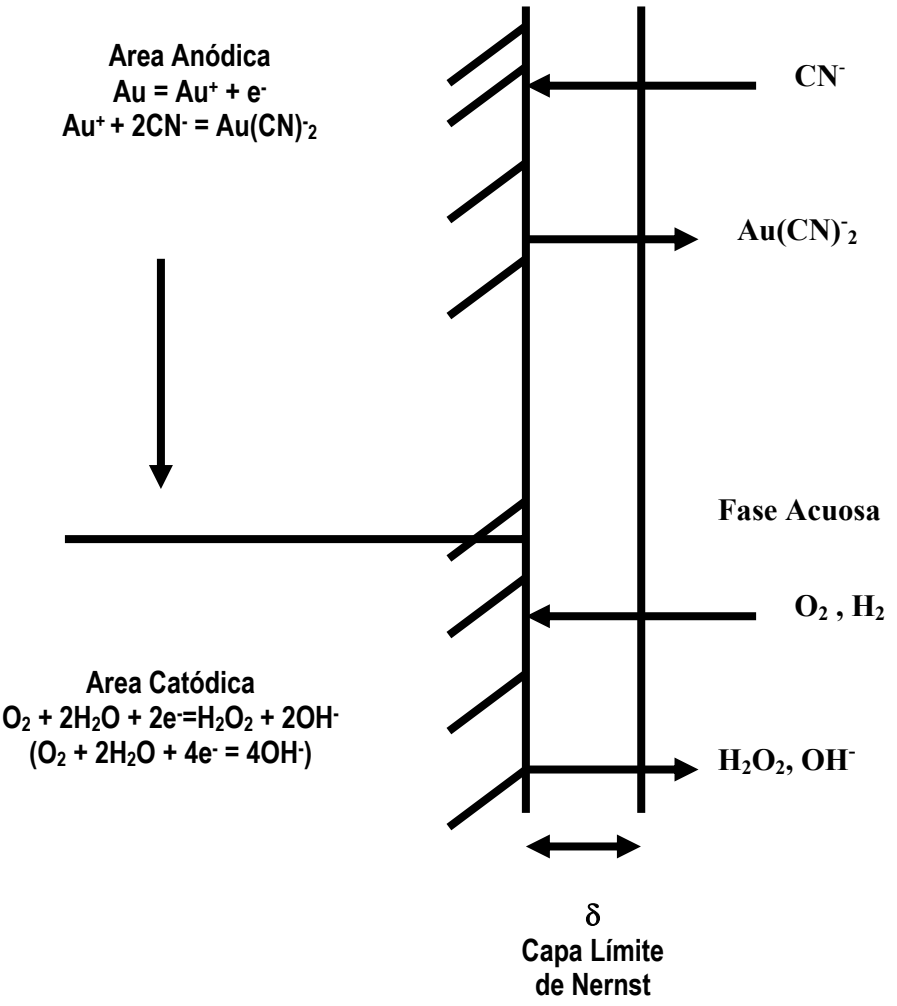
Una representación esquemática de este proceso se muestra en la Figura 3. Este esquema está más en concordancia con la ecuación química de Bodlaender (formación intermedia de H_2O_2) que con la ecuación de Elsner, lo cual puede confirmarse con el hecho de que pequeñas adiciones de H_2O_2 aumentan ligeramente el grado de disolución del oro, pero concentraciones mayores, pasivan la superficie y retardan la disolución.

Aparte de la reacción química, la cianuración de oro está regida por procesos físicos de difusión con varias etapas; entre ellas: Disolución de cianuro y oxígeno, transporte de estos reactivos a la superficie de mineral, adsorción del cianuro y oxígeno, la reacción electroquímica y la formación del complejo cianurado y al final la desorción y transporte de este complejo a la solución.

Este proceso de cianuración, obedece a parámetros químicos como la concentración de cianuro y oxígeno, la influencia de la agitación, que afecta la

difusión y la temperatura que afecta la velocidad de reacción química, además está la alcalinidad que actúa como agente protector evitando hidrólisis del cianuro.

Cuando el proceso se presenta en condiciones normales de agitación, temperatura y oxígeno disuelto, la disolución la rige la difusión de CN^-, pero si la concentración de CN^- se aumenta hasta que sea mayor que la concentración de O_2, está regirá la disolución.



Fuente: López, María Esperanza. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de minerales auroargentiferos. Tesis de Maestría en ingeniería metalúrgica, UIS, 1999. Bucaramanga

Figura 3. Disolución Electroquímica de Oro en Soluciones Cianuradas

1.4.3 Efecto de las principales variables sobre la cianuración. El proceso de lixiviación de minerales, a través de un reactivo químico, está influenciado por una gran cantidad de variables, que muchas veces dificultan su control.

Entre los principales factores que influencian el proceso de cianuración de minerales de oro tenemos: tamaño de partícula, concentración de cianuro, agitación, alcalinidad, concentración de oxígeno, temperatura, agentes reductores, etc.

1.4.3.1 Tamaño de partícula [4]. La velocidad de disolución es directamente proporcional al área superficial expuesta del oro y otros factores particulares. El área superficial expuesta está relacionada con la distribución del tamaño de partícula y las características de liberación del material alimentado, y está afectada por la eficiencia en el proceso de conminución que precede la lixiviación. La disolución generalmente aumenta con el decrecimiento del tamaño de partícula, debido al incremento en la liberación del oro y/o del área superficial expuesta. Sin embargo, este no siempre es el caso y la velocidad de disolución del oro en minerales que contienen cianicidas puede disminuir con el decrecimiento del tamaño de partícula, debido al incremento en la velocidad de consumo de cianuro por parte de los cianicidas. En tales casos, el tamaño de partícula óptimo requiere de un compromiso entre la extracción del oro y el consumo de cianuro.

1.4.3.2 Concentración de cianuro. El efecto de la concentración de cianuro, se analiza tomando una velocidad constante (5cm/s) y sometiendo las muestras a diferentes concentraciones de cianuro, donde se obtienen resultados como los mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Influencia de la concentración de cianuro en la disolución de oro

Concentración % NaCN	Disolución $Mg/cm^2/h$
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**

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 % la velocidad de disolución se mantenía constante. Es por esta razón que la mayoría de las plantas de cianuración utilizan soluciones entre 0.02 y 0.03 % de cianuro libre para tratar sus minerales de oro.

1.4.3.3 Concentración de oxígeno. El uso de oxígeno o un agente oxidante es esencial para la disolución del oro bajo condiciones normales de cianuración. Para este propósito, suele utilizarse el oxígeno absorbido por las soluciones circulante y agitada y muchas veces introducido como adición en los tanques de agitación.

El efecto debido a la concentración de oxígeno en la disolución de minerales de oro mediante cianuración, se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Influencia de la concentración de oxígeno en la cianuración

% NaCN	Mg O_2/litro	Disolución mg/cm^2/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	1.67
	12.3	1.62
	17.7	1.55
0.25	21.3	1.67
	26.8	1.62
	32.2	1.55
	9.5	1.70
	13.6	1.03
	22.7	0.72
	28.6	1.54
	33.6	2.11
0.10	2.8	0.30
	4.0	0.54
	9.0	1.80
	14.2	2.63
	17.2	2.40
	24.6	2.01
	31.0	1.81

0.20	**9.0**	**1.76**
	14.3	**2.80**
	22.5	**3.70**
	27.8	**4.15**
	33.5	**3.30**
0.50	**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: 208

Según estos resultados, el aumento de la concentración de oxígeno en la disolución aumenta hasta un máximo, por encima del cual disminuye la disolución, pero este máximo aumenta con la concentración de cianuro.

La concentración de oxígeno que presenta mayor razón de disolución no está definida, pero parece estar entre 14 y 28 mg O_2 por litro de solución o entre 31 y 62 % de saturación.

Aunque el exceso de oxígeno en la solución puede disminuir la velocidad de disolución, en la práctica los minerales de oro contienen constituyentes consumidores de ben la disolución, pudiendo el problema deberse a deficiencia de oxígeno.

1.4.3.4 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 [4].

Para modificar el pH se pueden usar diferentes tipos de álcalis, pero generalmente el más usado es el hidróxido de calcio. Las funciones del hidróxido de calcio en la cianuración son las siguientes:

- ✓ Evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis.
- ✓ Prevenir pérdidas de cianuro por la acción del anhídrido carbónico del aire.
- ✓ Neutralizar los componentes ácidos tales como las sales ferrosas, férricas y el sulfato de magnesio contenido en el agua del ingenio antes de agregar al circuito de cianuración.
- ✓ Descomponer los bicarbonatos del agua del ingenio antes de su uso en la cianuración.
- ✓ Neutralizar la acidez de los constituyentes de la mena.
- ✓ Neutralizar los componentes ácidos resultantes de la descomposición de los diferentes minerales de la mena en las soluciones de cianuro.
- ✓ Facilitar el asentamiento de las partículas finas de modo que pueda separarse la solución rica clara de la mena cianurada.
- ✓ Mejorar la extracción cuando se tratan menas que contienen teluros, plata roja o rocicler que se descomponen más rápidamente a una mayor alcalinidad.

Sin embargo, algunos investigadores han determinado que la velocidad de disolución disminuye rápidamente con la adición de cal, cuando se está cerca de pH = 11 y llega a ser casi nula a pH cercano a 12. Esta influencia se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Influencia de la concentración de álcalis en la cianuración

% NaOH	Disolución mg/cm^2/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^2/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

Según estos resultados, el aumento en la concentración de álcalis tiene efecto adverso en la disolución de oro. Por tanto, la alcalinidad debe ser cuidadosamente controlada y en general, es mejor mantenerla en un punto lo más bajo posible para lograr una buena recuperación.

1.4.3.5 Temperatura. Cuando se aplica calor a una solución de cianuro que contiene oro, dos factores opuestos influyen en la velocidad de disolución. El aumento de la temperatura agiliza la actividad de la solución y consiguientemente acelera la velocidad de disolución. Al mismo tiempo, la cantidad de oxígeno en la

solución disminuye porque la solubilidad de los gases decrece con el aumento de la temperatura.

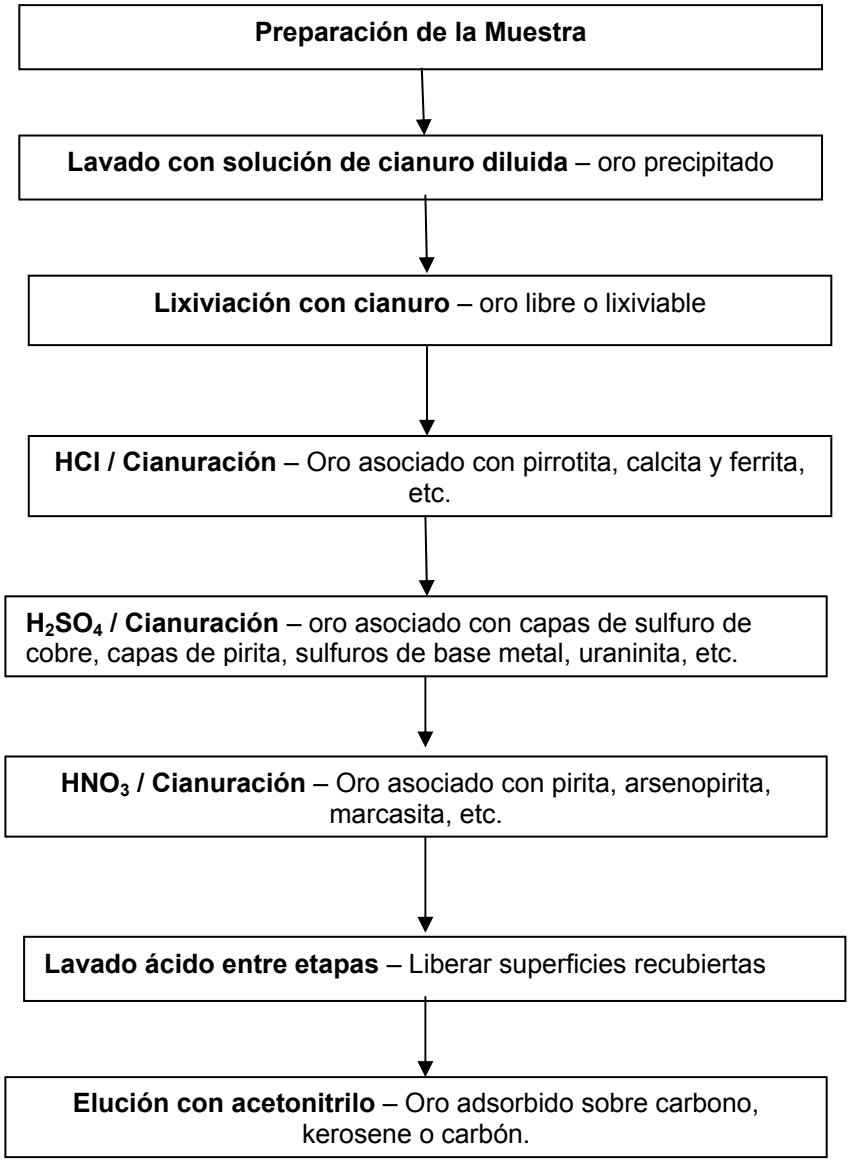
En la práctica, el uso de soluciones calientes para la extracción del oro de una mena tiene muchas desventajas, tales como el costo de calentamiento de la pulpa, el aumento de la descomposición del cianuro debido al calor y el consumo excesivo de cianuro a causa de la reacción acelerada entre los cianicidas de la mena (sulfuros de cobre, de hierro, etc.) y el cianuro.

1.4.3.6 Agitación. La disolución de oro es usualmente controlada por el transporte de masa dentro de las condiciones normalmente aplicadas para la lixiviación por cianuración. El incremento en la agitación incrementa la velocidad de disolución hasta un máximo, a partir del cual la agitación tiene poco o ningún beneficio sobre la disolución.

1.5 LIXIVIACIÓN DIAGNÓSTICA DE MENAS AURÍFERAS.

1.5.1 Generalidades. El concepto de lixiviación de diagnóstico, 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 diluído) y cianurado para extraer el oro liberado en esta primera etapa de destrucción del mineral menos estable con el cual se encontraba asociado. Luego los sólidos son lavados con solución diluida de cianuro y se repite el procedimiento de destrucción del siguiente mineral que pueda estar asociado con el oro [6]. El proceso se repite con una lixiviación ácida cada vez más oxidativa hasta que todo el oro no refractario y recianurado es lixiviado por el cianuro y se obtiene un registro de la cantidad de oro asociado con cada uno de los diferentes minerales presentes en la matriz de la muestra. La extensión total de la reacción de extracción generalmente está dentro del 90 %. Una representación típica de un

ensayo de lixiviación diagnóstica de minerales auríferos, se presenta a continuación mediante un diagrama de flujo.



Fuente: Lorenzen, L. Some guidelines to the design of a diagnostic leaching experiment. Minerals Engineering, Vol. 8, No. 3, pg 247 - 256, 1995.

Figura 4. Ensayo de lixiviación diagnóstica a minerales auríferos

Con la lixiviación de diagnóstico, el metalurgista o científico está en la capacidad de establecer con cuales minerales se encuentra asociado el oro dentro de una muestra específica. Esta información puede ser usada para diseñar circuitos de extracción, solucionar problemas existentes en plantas y/o evaluar el efecto de diferentes reactivos usados en la extracción del oro.

La técnica puede aplicarse a algún tipo de problema en planta causado por cambios en la operación, cambio en los reactivos usados, cambios en la mineralogía y/o el comportamiento del oro alimentado a la planta, o una combinación de ellos.

Este método también puede aplicarse para establecer las causas de la refractariedad de los minerales refractarios de oro, para el análisis de minerales sulfurados, etc.

1.6 MOLIENDA MECÁNICA DE ALTA ENERGÍA

1.6.1 Generalidades. Se ha denominado molienda mecánica o de alta energía, a la molienda de polvos de composición uniforme (frecuentemente estequiométrico), tales como los metales puros, intermetálicos o polvos prealeados [7].
Mediante la aplicación de la molienda mecánica en los minerales, se pueden lograr los siguientes efectos [8]:

- Conminución del mineral a tamaño de grano de fineza coloidal (aproximadamente igual o menor a 1 micrón).
- Síntesis de partículas nuevas y fases cristalinas.
- Desarrollo de fases amorfas.
- Desarreglo del acomodamiento intermetálico.
- Posibilidad de aleado de elementos difíciles de alear.
- Inducción de reacciones químicas a bajas temperaturas.

La molienda de alta energía se lleva a cabo en los molinos de bolas, los cuales son dispositivos de formas geométricas diferentes, como se observa en la figura 5, que se llenan con partículas cilíndricas, esféricas o redondeadas que están disponibles en diferentes materiales como ágata, corindón sinterizado, carburo de tungsteno, acerocromo templado, acero inoxidable, óxido de circonio, etc. [9].

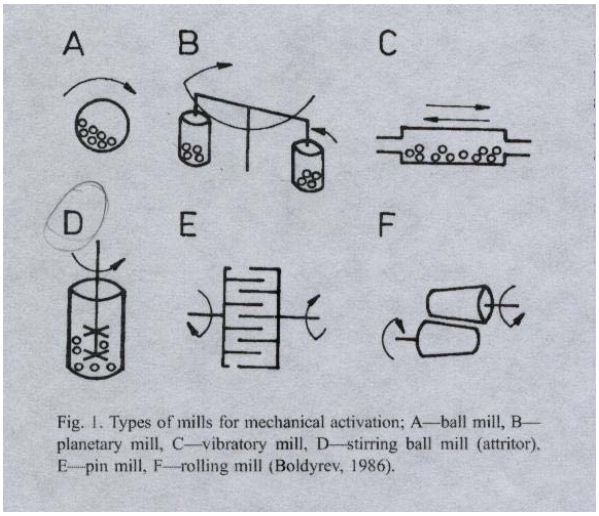


Fig. 1. Types of mills for mechanical activation; A—ball mill, B—planetary mill, C—vibratory mill, D—stirring ball mill (attritor), E—pin mill, F—rolling mill (Boldyrev, 1986).

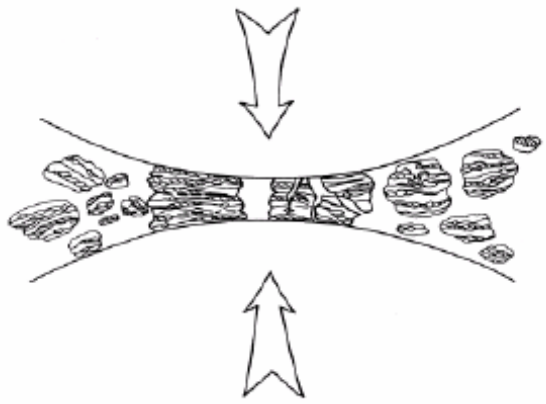
Fuente: P. Baláz. "Mechanical activation in hydrometallurgy". Internacional journal of mineral processing, 2003. Elsevier.

Figura 5. Tipos de molinos para molienda de alta energía.

Una alternativa para el aumento de la reactividad de los minerales lo constituye la activación mecánica mediante molienda de alta energía, la cual induce cambios en un gran número de propiedades fisicoquímicas de un sistema en particular.

Adicionalmente, la molienda mecánica de polvos disminuye el efecto de oxidación de los polvos constituyentes, lo cual está relacionado con la corta duración del proceso. Algunos investigadores [8], se han referido a la molienda mecánica como "triturado mecánico", debido a que el triturado se describe como un proceso de mecanizado abrasivo que contempla principalmente esfuerzos de cizalladura.

1.6.2 Activación mecánica por la molienda de alta energía. Durante la molienda de alta energía de partículas de polvo, éstas son aplastadas, soldadas en frío, fracturadas, y otra vez soldadas. Típicamente, alrededor de 1000 partículas con un peso agregado de cerca de 0,2 mg son atrapadas durante cada colisión (figura 6). La fuerza de los impactos deforman plásticamente las partículas de los polvos, endureciéndolas y fracturándolas. Las nuevas superficies creadas permiten a las partículas soldarse juntas y esto lleva a un aumento en el tamaño de la partícula.



Fuente: Gutiérrez Pérez Denis Nathalia. Disolución de la ilmenita ($FeTiO_3$) proveniente de arenas negras, inducida por molienda de alta energía. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. 2004

Figura 6. Colisión bola-polvo-bola en el proceso de molienda.

La molienda mecánica de alta energía introduce una fuerte deformación de las partículas. Ésta se manifiesta por la presencia de una variedad de defectos cristalinos tales como dislocaciones, vacancias, agrupación de fallas, y un incremento de los límites de grano.

Generalmente un incremento en la reactividad química inducida en sólidos por tratamientos mecánicos tales como la molienda con bolas o pulverización, se denomina activación mecánica.

El primer efecto de la activación mecánica es la conminución de las partículas del mineral, lo cual genera cambios en un gran número de propiedades fisicoquímicas de un sistema particular. Esta desintegración por molienda de alta energía está acompañada por un incremento en el número de partículas y por la generación de superficies nuevas y libres antes inexpuestas. Esto generalmente tiene una influencia positiva en la cinética de la posterior lixiviación aplicada al mineral.

La activación mecánica originada por la molienda mecánica de alta energía puede ser subdividida dentro de dos procesos [10]. El primer proceso (incremento de la energía interna y superficial, incremento del área superficial, decrecimiento de la energía de coherencia de los sólidos) generalmente incrementa la reactividad del mineral. El segundo proceso (agregación, adsorción, recristalización) aparece espontáneamente en el sistema activado y puede presentarse durante o después de que la molienda ha finalizado.

El aumento en la reactividad química de sólidos está vinculado con el incremento de área superficial, el tamaño pequeño de partículas y los defectos estructurales los cuales son producidos por tratamientos mecánicos. Sin embargo, recientemente se observó que la reactividad química de los materiales se incrementa continuamente con el tiempo de molienda por periodos extensos (mas de 100 horas), mientras que el área superficial de los materiales tratados disminuye por los efectos de aglomeración.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1 PLAN DE TRABAJO

Dentro del conjunto de procedimientos seguidos durante el desarrollo de este trabajo con los cuales se alcanzo el total de los objetivos planteados en la propuesta de investigación, las etapas planteadas fueron las siguientes **(figura 7).**

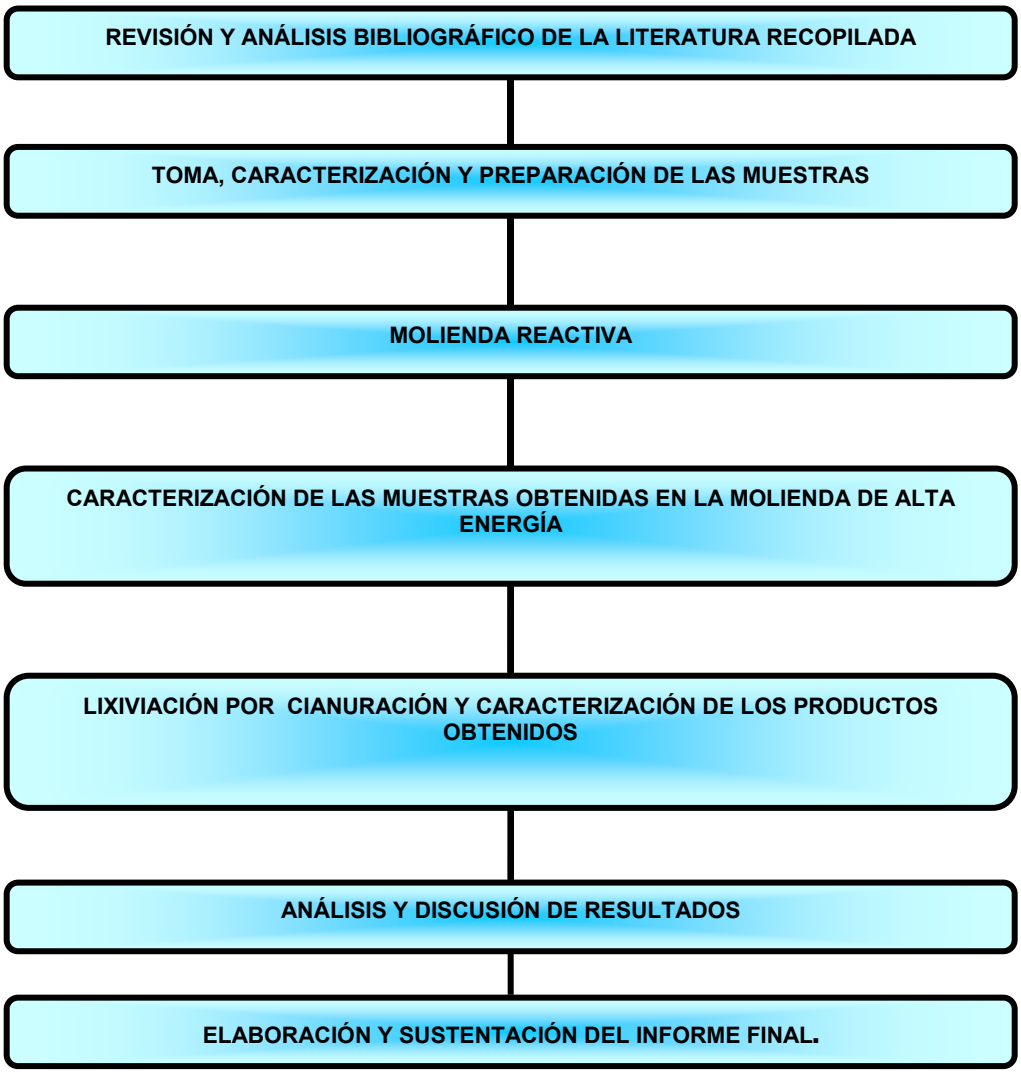


Figura 7. Plan de trabajo

El desarrollo del trabajo de investigación se realizó en cinco etapas, cada una de estas etapas contempla la realización de diversas actividades según se describe a continuación:

Etapa 1. Revisión y análisis bibliográfico de la literatura recopilada

En esta etapa, se revisó el material bibliográfico disponible, con el fin de capacitarse más profundamente sobre los aspectos referentes a la metalurgia extractiva del oro, también se revisaron documentos sobre la molienda reactiva y se revisaron protocolos en el manejo de equipos del laboratorio para análisis relacionados con la metalurgia del oro y la molienda mecánica.

Se incluye en esta etapa, la recopilación y lectura de artículos internacionales sobre lixiviación de diagnóstico, diversas tesis de grado de pregrado, trabajos de Grupos de Investigaciones relacionados con el tema de los minerales auríferos, material bibliográfico relacionado con la extracción de oro, análisis químico, la mineralogía de procesos y análisis y estudio de minerales auríferos.

Etapa 2. Toma, caracterización y preparación de las muestras

En esta etapa (*figura 8*) se realizó la toma de diferentes muestras y se seleccionó la más apropiada para efecto de la realización del proyecto. El mineral elegido fue el provisto por la Compañía Minera “Mina Reina de Oro”, el cual fue escogido inicialmente por su ley y su alto contenido de pirita. Este alto contenido de pirita en una primera aproximación suponía un alto grado de refractariedad, característica ideal para la investigación, la cual se corroboró posteriormente mediante la lixiviación de diagnóstico.

Para efectos de la caracterización del mineral, éste fue sometido a ensayos de difracción de rayos X, infrarrojo, absorción atómica, termogravimetría, lixiviación

de diagnóstico y análisis granulométrico. Los ensayos de infrarrojo y termogravimetría se realizaron en la Escuela de Ingeniería Química de la UIS y, el DRX se llevó a cabo en la Escuela de Química de la UIS.

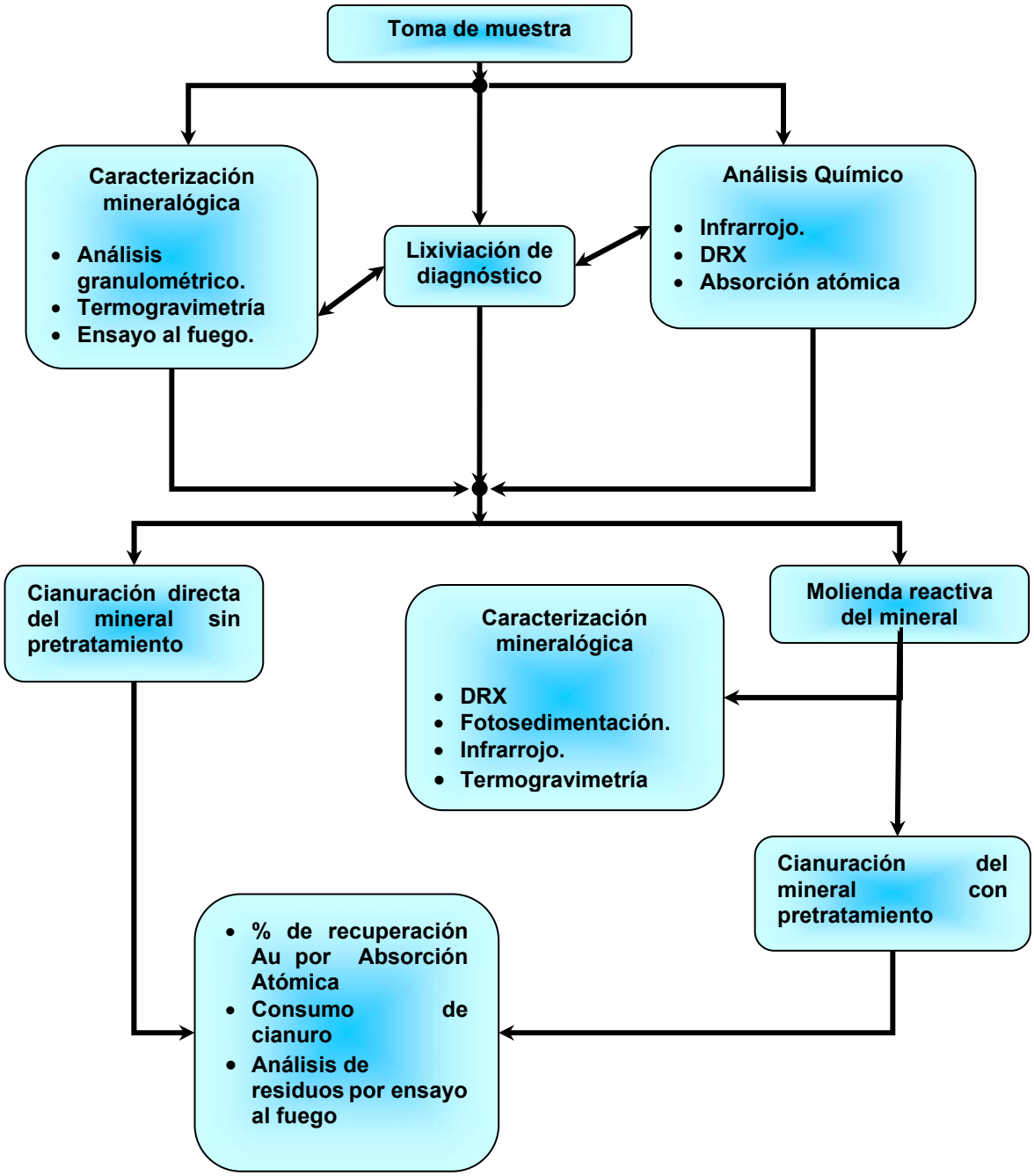


Figura 8. Metodología experimental.

Para la determinación de la ley, el mineral fue sometido a ensayo al fuego y espectrofotometría de absorción atómica, los cuales se llevaron a cabo, respectivamente, en la planta de aceros de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y los laboratorios en Guatiguará del "Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgía y Ambiente" de la Universidad Industrial de Santander.

El análisis de distribución granulométrica de la muestra original fue realizado en los laboratorios de procesamiento de minerales de la Universidad Industrial de Santander mediante tamizado del mineral en mallas Tyler.

Se realizó la lixiviación de diagnóstico a la muestra (*Figura 9*), en la planta de aceros de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, con el fin de establecer las asociaciones mineralógicas responsables de la refractariedad del mineral.

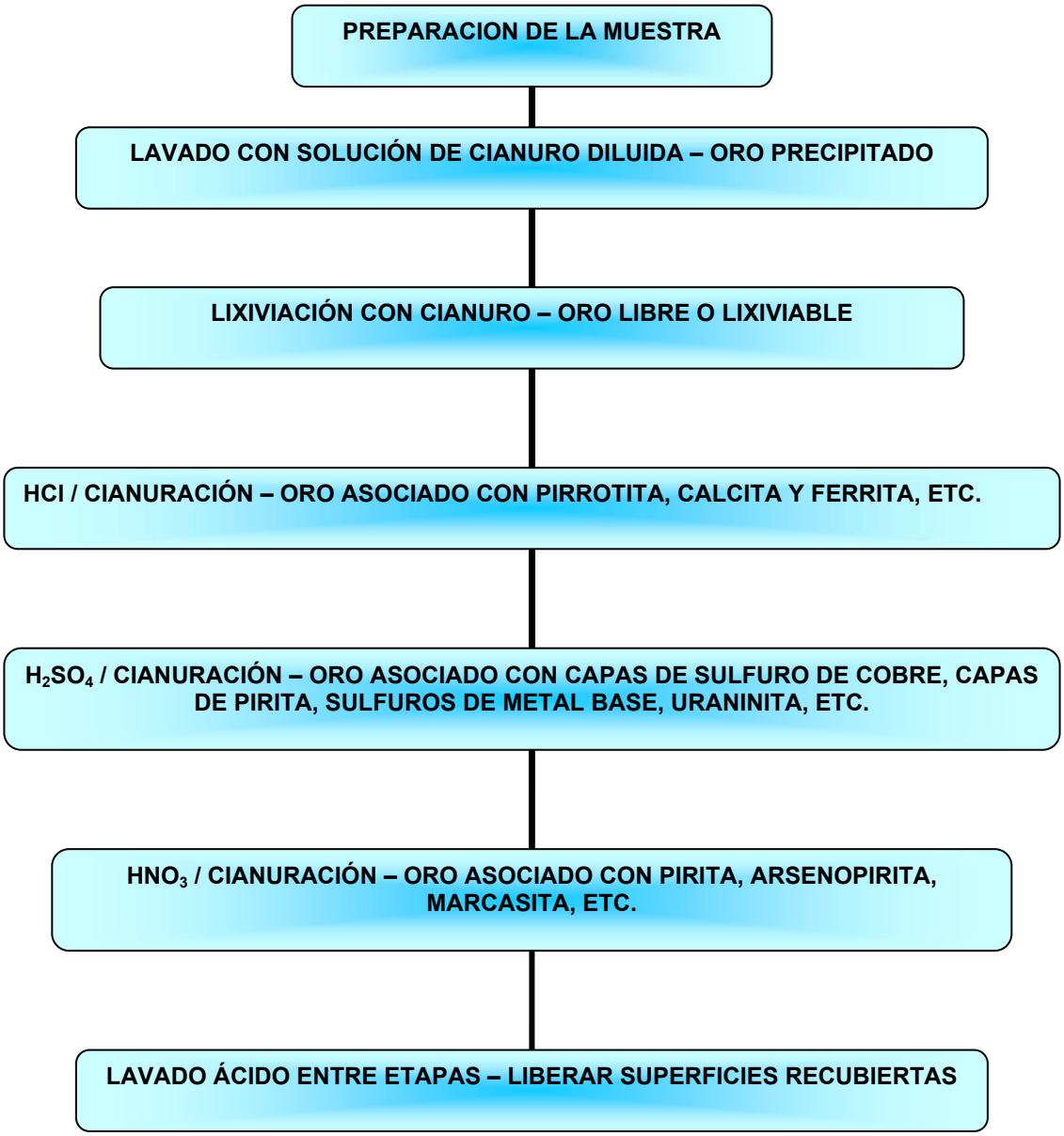


Figura 9. Lixiviación de diagnóstico del mineral refractario de oro.

ETAPA 3: MOLIENDA REACTIVA

En esta etapa se llevaron a cabo ensayos de molienda mecánica en un molino attritor, (Figura 10), bajo diferentes condiciones experimentales. Las variables analizadas fueron el tiempo de molienda y el pH, manteniendo constante la relación peso de bolas a peso de mineral, velocidad de rotación, temperatura y granulometría inicial.

La variable respuesta fue la granulometría del mineral después de ser sometida a la activación mecánica.

Los tiempos de molienda fueron 10, 20 y 40 horas para las dos condiciones de pH, éste fue variado con CaO, obteniéndose así 6 muestras cada una de 120g.

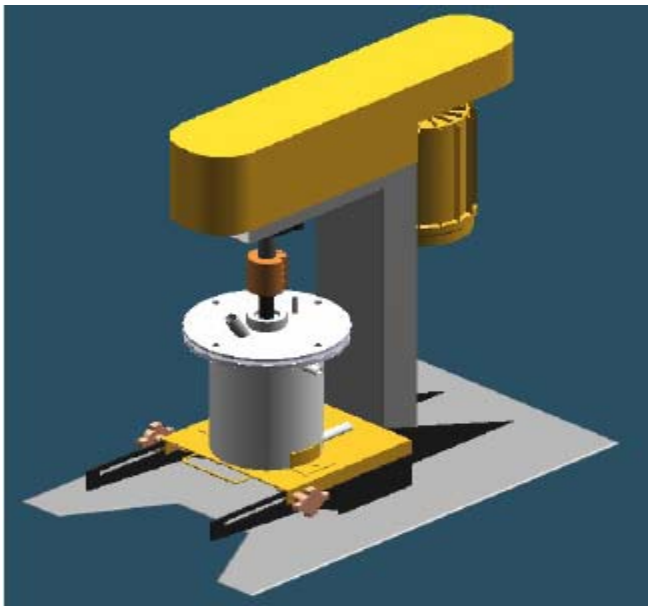


Figura10. Molino Attritor

ETAPA 4: CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN LA MOLIENDA DE ALTA ENERGÍA.

Esta etapa del proyecto comprendió la caracterización físico-química, mineralógica y granulométrica del mineral activado mecánicamente con el objeto de estimar los cambios inducidos en el mineral por efecto de la molienda de alta energía y estimar sus posibles incidencias en la posterior lixiviación. La caracterización de las muestras (figura 8), se llevó a cabo mediante análisis químico por difracción de rayos X, infrarrojo, termogravimetría, y fotosedimentación. Estas pruebas fueron realizadas en la escuela de Química e Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander. Cabe anotar que éstos ensayos, excepto el de fotosedimentación debido a condiciones de granulometría, fueron aplicados al mineral original en la etapa 2 con el fin de caracterizarlo, pero a su vez en ésta etapa se usaron para establecer las diferencias entre éste y el mineral sometido a molienda mecánica de alta energía.

ETAPA 5: LIXIVIACIÓN POR CIANURACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS.

En esta etapa se llevó a cabo la lixiviación del mineral con y sin activación mecánica, tomándose como variables el tiempo de lixiviación y la granulometría del mineral. El pH, la temperatura, la velocidad de agitación, la concentración de cianuro y la densidad de pulpa se mantuvieron constantes. La solución licor se analizó mediante espectrofotometría de absorción atómica, mientras que los residuos sólidos se sometieron a ensayo al fuego para determinación de oro.
La variable respuesta fue el porcentaje de disolución de oro, cuyos datos se usaron para evaluar la cinética de la cianuración bajo las diferentes condiciones.
Las condiciones de lixiviación y lavado (*Figura 11*) fueron las siguientes:

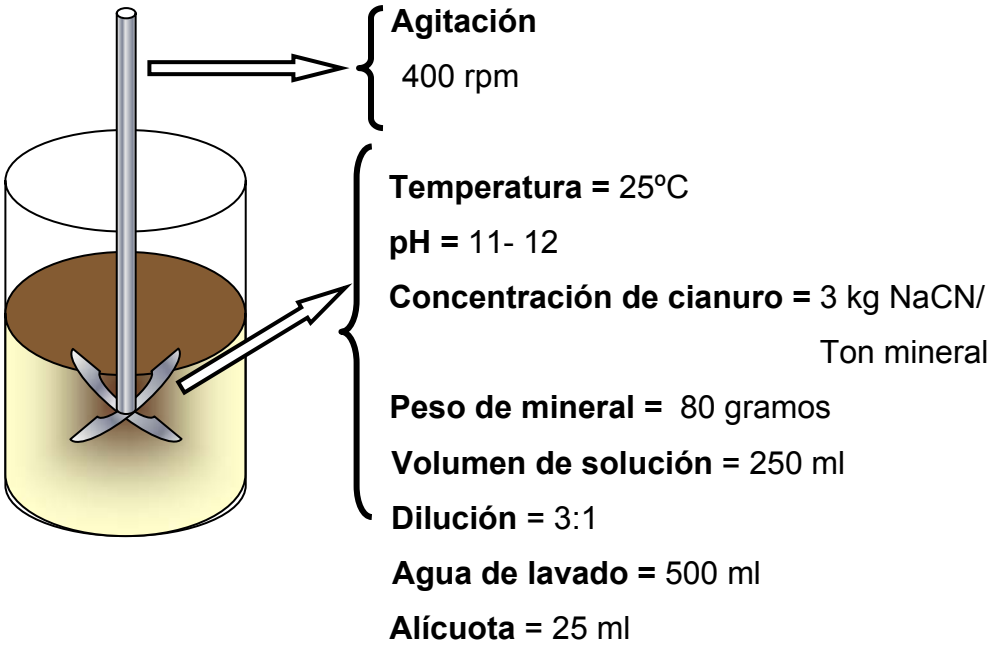


Figura 11. Condiciones de lixiviación

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este capitulo se presentan los resultados de las diferentes pruebas y ensayos aplicados a las muestras en estudio. Estos resultados constituyen principalmente los de ensayo al fuego, molienda mecánica, lixiviación de diagnóstico y lixiviación convencional.

3.1 ENSAYO AL FUEGO.

Como primera medida, se realizó el ensayo al fuego del mineral de interés con el fin de confirmar la presencia de oro, y a su vez determinar de manera aproximada la ley del mineral. El valor obtenido en este ensayo fue corroborado con el obtenido mediante espectrofotometría de absorción atómica. Las condiciones a las cuales se realizaron los ensayos son las siguientes:

- Temperatura de tostación: 700-750°C
- Tiempo de tostación: 1 hora
- Temperatura de fusión: 950-1000°C
- Tiempo de fusión: 1 hora.
- Temperatura de copelación: 900°C
- Peso de mineral: 30 gramos.
- Peso de litargirio: 40 gramos.
- Peso de carbonato de sodio: 40 gramos.
- Peso de bórax: 10 gramos.
- Peso de harina de trigo: 5 gramos.

Los resultados obtenidos en el ensayo al fuego son (Tabla 6):

Tabla 6. Resultados obtenidos en el ensayo al fuego

Muestra Nº	Tenor Au gr Au/Ton mineral	Tenor Ag gr Ag/Ton mineral	Tenor promedio Au gr Au/Ton mineral	Tenor promedio Ag gr Ag/Ton mineral
1	36.33	97.33	36.665	95.83
2	37	94.33		

3.3 MOLIENDA MECÁNICA DE ALTA ENERGIA

Como se indicó en párrafos anteriores, la molienda mecánica de alta energía fue realizada en un molino attritor. En esta etapa siempre se mantuvo constante la relación peso de mineral a peso de bolas de 1:10; utilizando 120 gramos de mineral y 1200 gramos de bolas.

En la Tabla 7, aparecen las condiciones y resultados obtenidos para la molienda mecánica de las muestras trabajadas.

Tabla 7. Condiciones de la molienda mecánica de alta energía

MUESTRA	HORAS DE MOLIENDA	PESO INICIAL DEL MINERAL (gramos)	PESO FINAL DEL MINERAL (gramos)	PESO DE CAL (gramos)	D* (in)	rpm
MAu	0	0	-	0	-	0
MN10	10	120	116.60		1/4	403,4
MN20	20	120	115.75			
MN40	40	120	116,20			
MC10	10	120	117,45	0,36		
MC20	20	120	112,02			
MC40	40	120	115.25			

D: Diámetro de bolas

En las Figuras 12 y 13, se muestra los difractógramas de las muestras que fueron molidas sin cal y con cal respectivamente comparadas con la muestra original del mineral, y en los cuales se distingue las diferentes fases del mineral entre las cuales se destacan la pirita, ortoclasa, cuarzo, jarosita y moscovita.

En la Figuras 13 a la 16 se observa el infrarrojo de las muestras molidas con cal y sin cal, las cuales son comparadas con la muestra original. Así mismo, se evidencia la concordancia entre las fases identificadas en el infrarrojo y las obtenidas por DRX.

En la figura 17 se presentan las curvas termogravimétricas de las muestras de mineral original y del mineral sometido a molienda por 10, 20 y 40 horas.

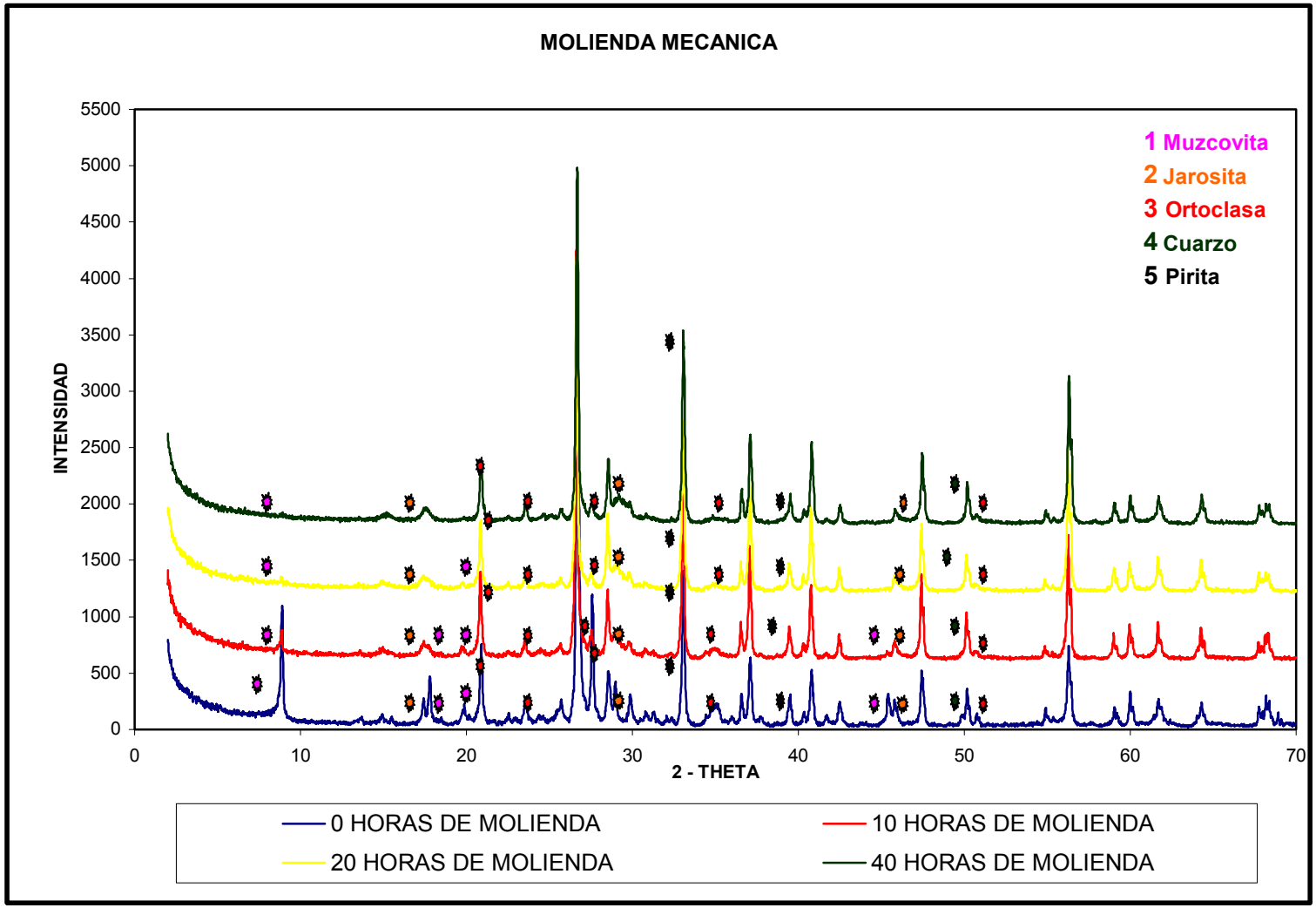


Figura 12. Difractógramas de las muestras sin cal con diferentes tiempos de molienda

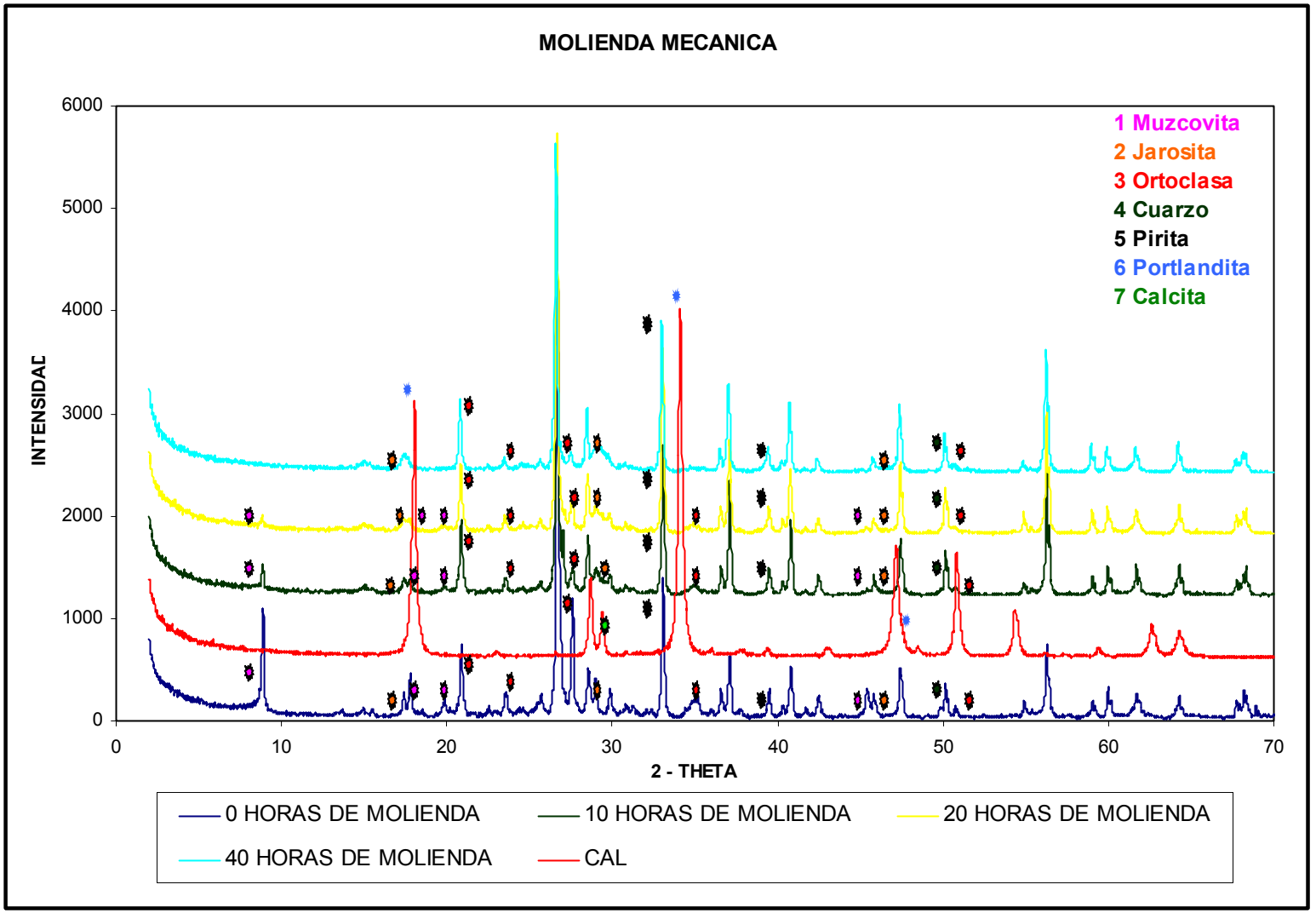
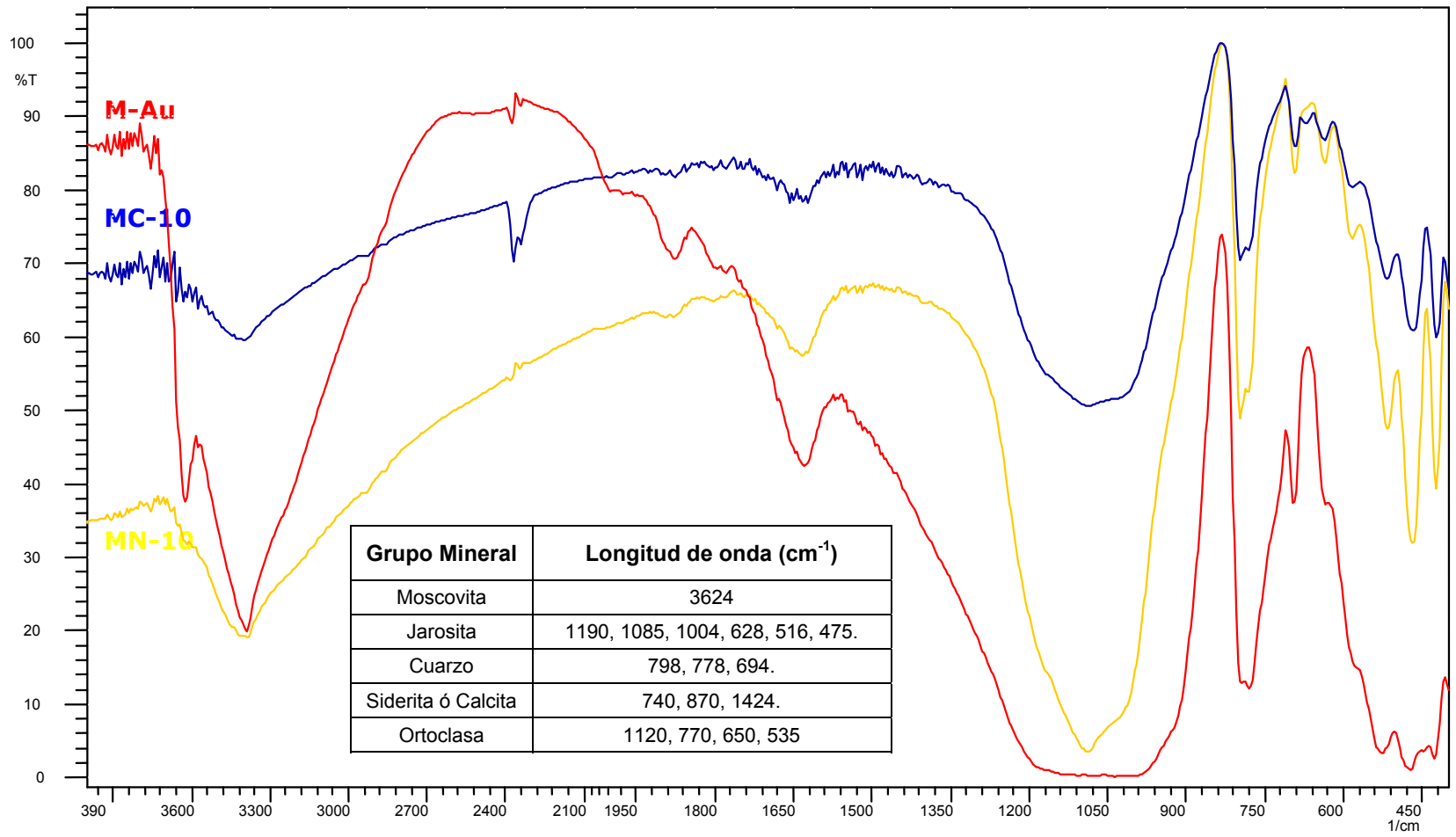
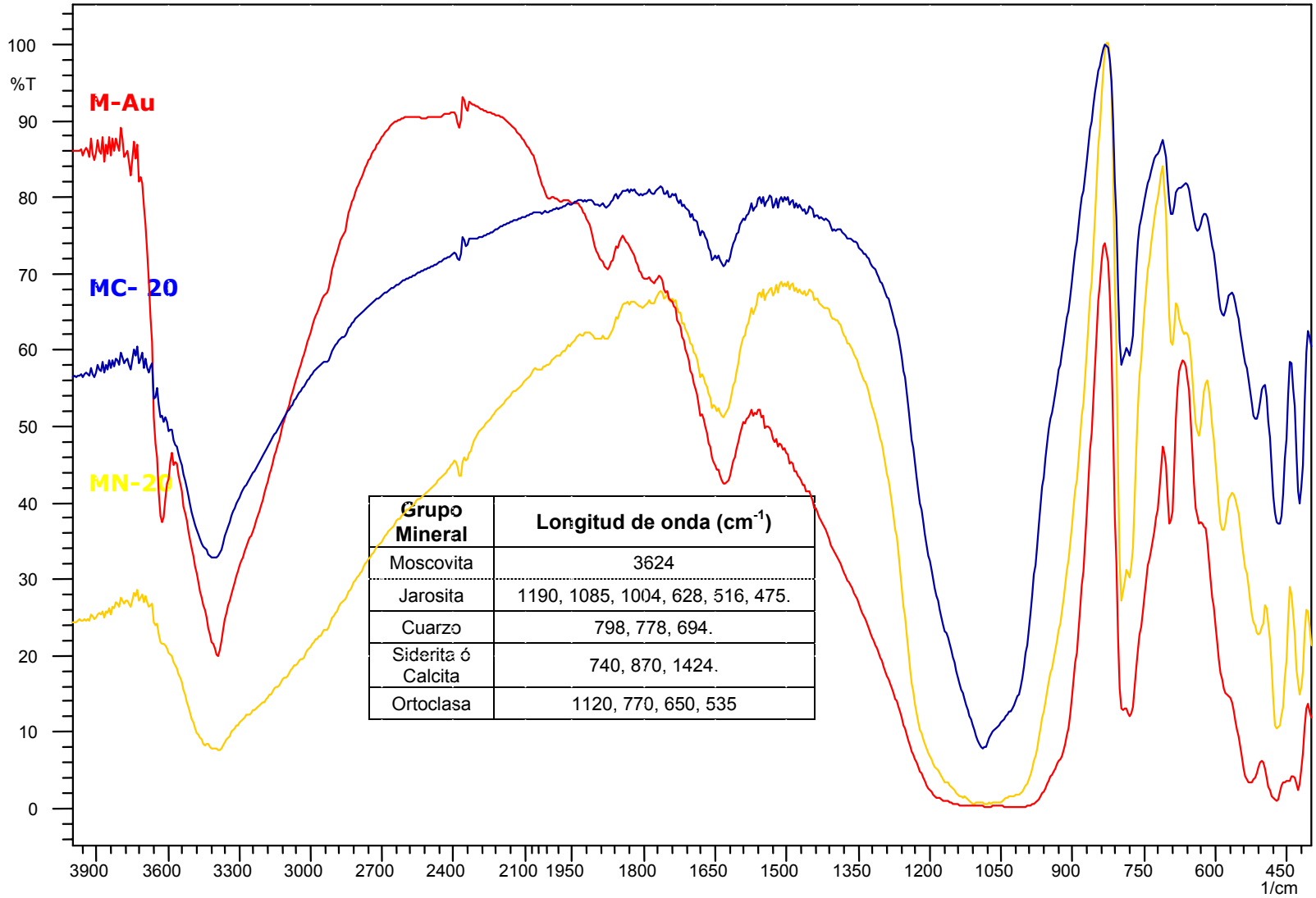


Figura 13. Difractógramas de las muestras con cal con diferentes tiempos de molienda



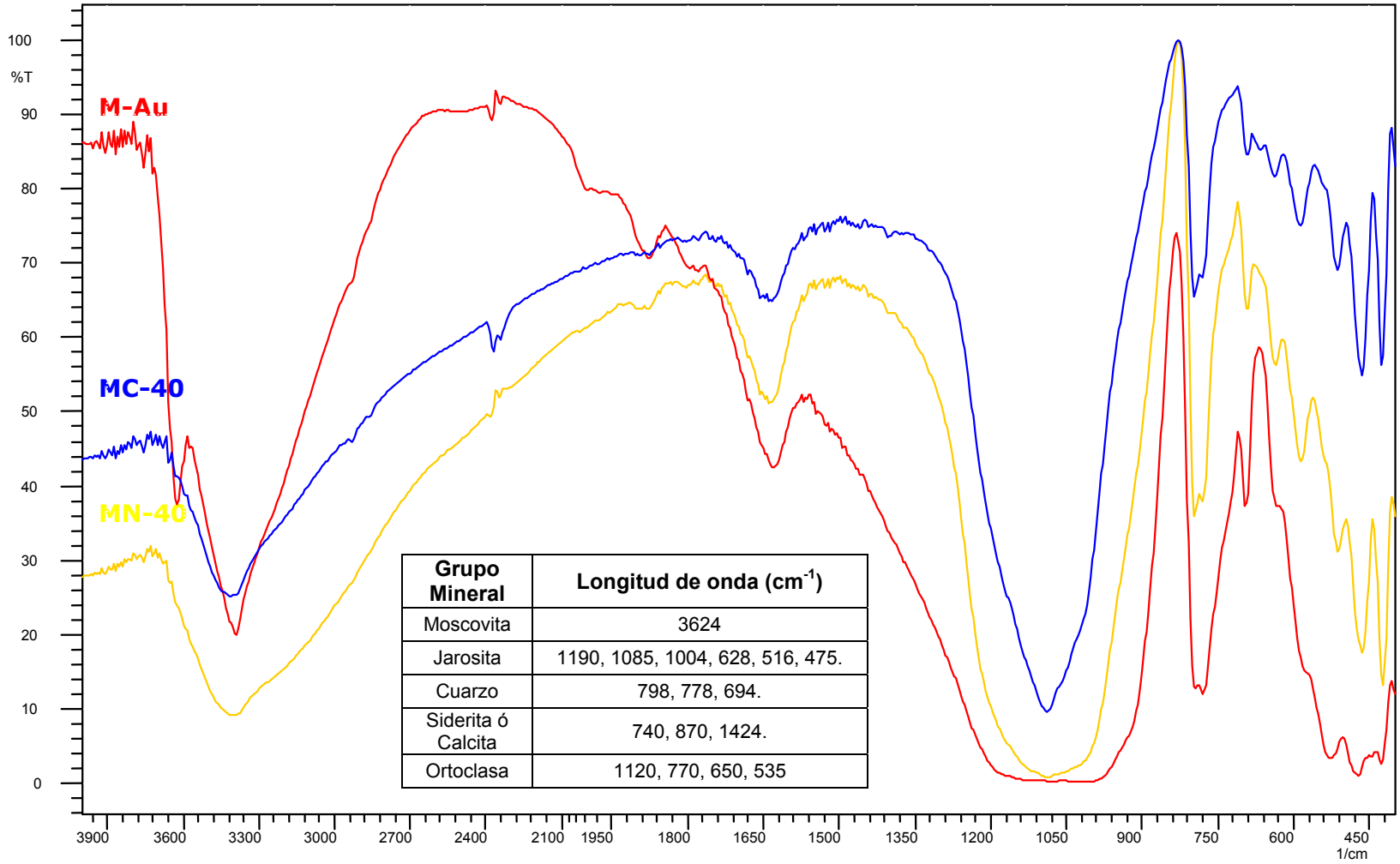
Grupo Mineral	Longitud de onda (cm^{-1})
Moscovita	3624
Jarosita	1190, 1085, 1004, 628, 516, 475.
Cuarzo	798, 778, 694.
Siderita ó Calcita	740, 870, 1424.
Ortoclasa	1120, 770, 650, 535

Figura 14. Espectro de Infrarrojo de las muestras con y sin cal molidas por 10 horas, comparadas con la muestra de mineral original.



Grupo Mineral	Longitud de onda (cm^{-1})
Moscovita	3624
Jarosita	1190, 1085, 1004, 628, 516, 475.
Cuarzo	798, 778, 694.
Siderita ó Calcita	740, 870, 1424.
Ortoclasa	1120, 770, 650, 535

Figura 15. Espectro de Infrarrojo de las muestras con y sin cal molidas por 20 horas, comparadas con la muestra de mineral original.



Grupo Mineral	Longitud de onda (cm^{-1})
Moscovita	3624
Jarosita	1190, 1085, 1004, 628, 516, 475.
Cuarzo	798, 778, 694.
Siderita ó Calcita	740, 870, 1424.
Ortoclasa	1120, 770, 650, 535

Figura 16. Espectro de Infrarrojo de las muestras con y sin cal molidas por 40 horas, comparadas con la muestra de mineral original.

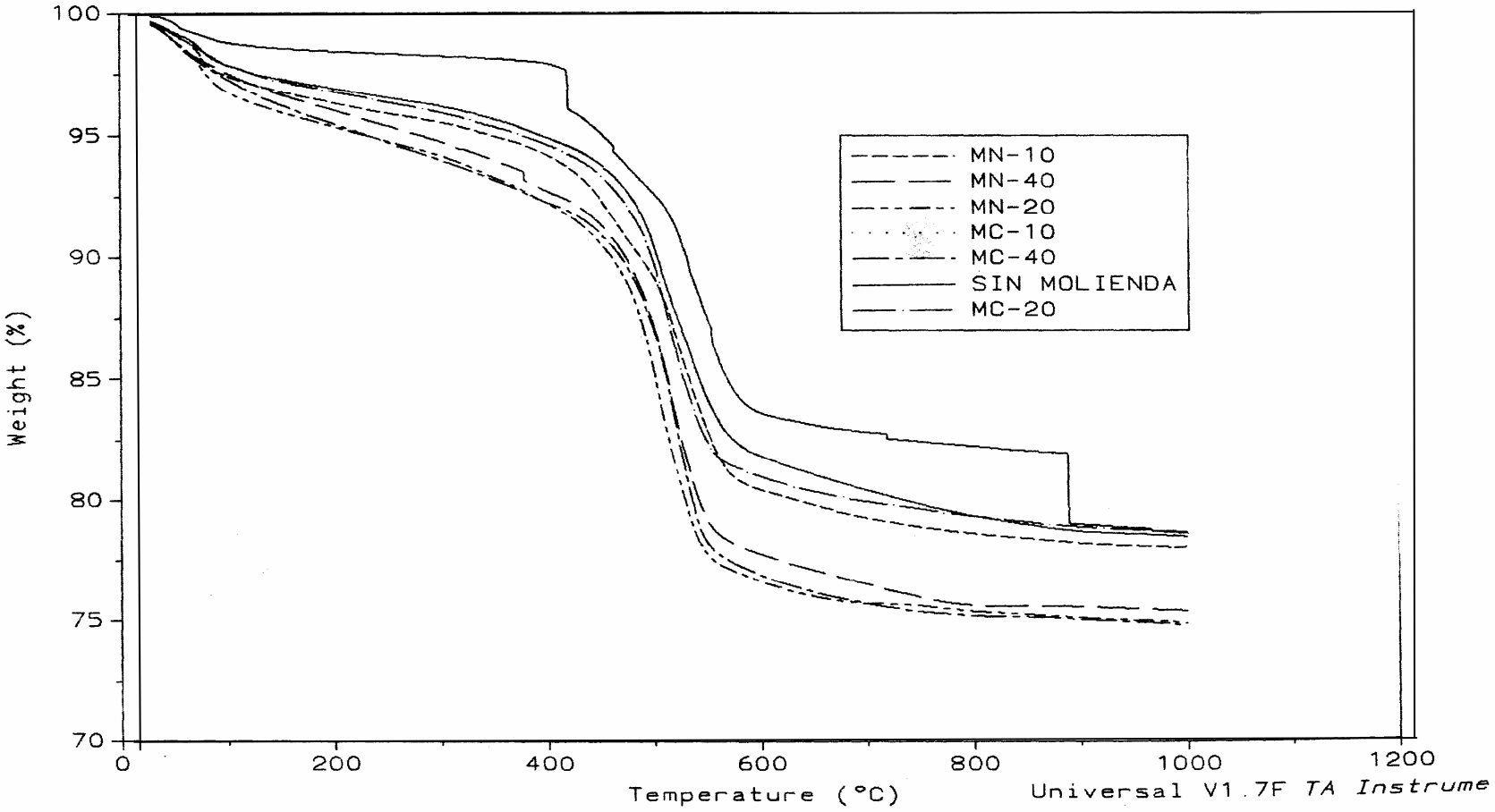


Figura 17. Termogravimetría de las muestras con diferentes tiempos de molienda y el mineral original

3.3 LIXIVIACIÓN

3.3.1 Lixiviación de diagnóstico del mineral sin molienda mecánica.

Con el fin de determinar las asociaciones mineralógicas responsables de la refractariedad, el mineral sin molienda fue sometido al procedimiento de lixiviación de diagnóstico mostrado en la Figura 9, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 8. Resultados de la lixiviación de diagnóstico.

Tipo de oro	Clasificación	Porcentaje en la muestra (%)
Tipo I	Oro libre o expuesto.	27
Tipo II	Oro asociado con silicatos.	8
Tipo III	Oro asociado con pirrotita, calcita, ferrita, dolomita, galena, goethita, carbonato de calcio.	9
Tipo IV	Oro asociado con capas de sulfuro de cobre, uraninita, esfalerita, sulfuros de base metal, capas de pirita.	4
Tipo V	Oro asociado con pirita, arsenopirita, marcasita.	52

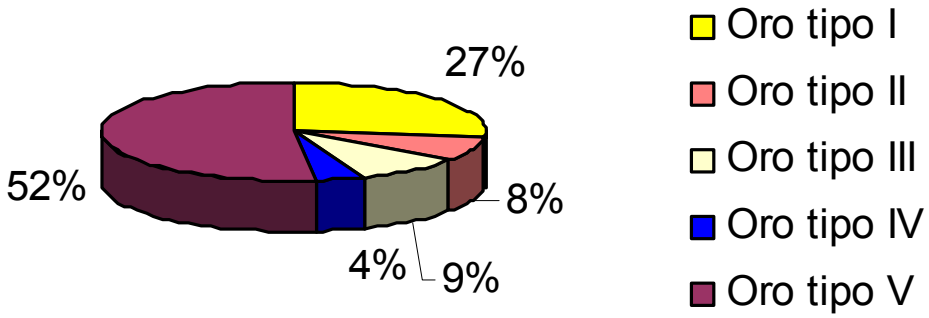


Figura 18. Resultados de la lixiviación de diagnóstico.

3.3.3 Lixiviación por cianuración

Inicialmente se realizó la determinación del porcentaje de Au presente en la muestra original mediante espectrofotometría de absorción atómica, obteniéndose una ley de 35.1762 g de Au/Ton de mineral. Este valor concuerda muy bien con el valor obtenido por ensayo al fuego. Con base en este dato, se determinó el nivel de disolución de oro durante el proceso de lixiviación con cianuro de sodio.

La muestra sin molienda y las molidas por 10, 20 y 40 horas, fueron lixiviadas durante 48 horas tomando alícuotas de 25 ml a las 8, 20, 30, 40 y 48 horas. Las alícuotas fueron analizadas mediante espectrofotometría de absorción atómica y medición de cianuro libre, con el fin determinar el porcentaje de disolución de oro y el consumo de cianuro respectivamente. Debido a la disminución del volumen como consecuencia de la toma de alícuotas, para efectos de los cálculos tanto de porcentaje de disolución de oro como de consumo de cianuro, se aplicó la respectiva fórmula de corrección (Ver anexo D). Las colas de la lixiviación se sometieron a ensayo al fuego.

En las Tablas 8 a 14 se presentan los resultados de la lixiviación por cianuración de las muestras de mineral con y sin molienda de alta energía, y las figuras 19 a 32 presentan los datos de disolución de oro y consumo de cianuro vs tiempo de lixiviación.

Tabla 9. Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación para muestra de mineral sin molienda de alta energía (MAu)

Tiempo de lixiviación	Porcentaje de disolución de oro (%)	Consumo de cianuro (Kg de NaCN/Ton de mineral)
0	0	0
8	16,47	1,5
20	23,33	1,67
30	37,87	1,72
40	36,79	1,78
48	39,87	1,94

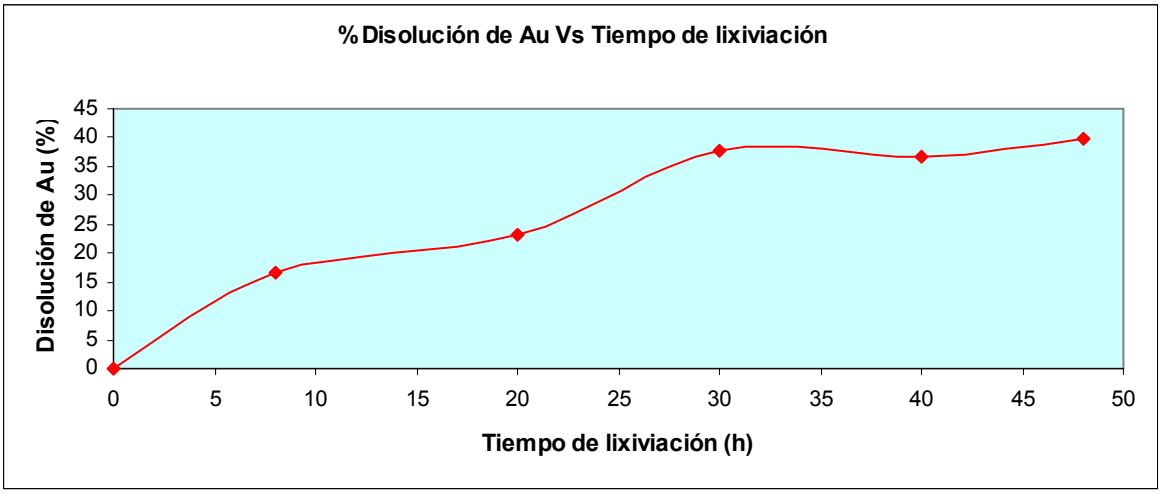


Figura 19. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra de mineral sin molienda de alta energía (MAu).

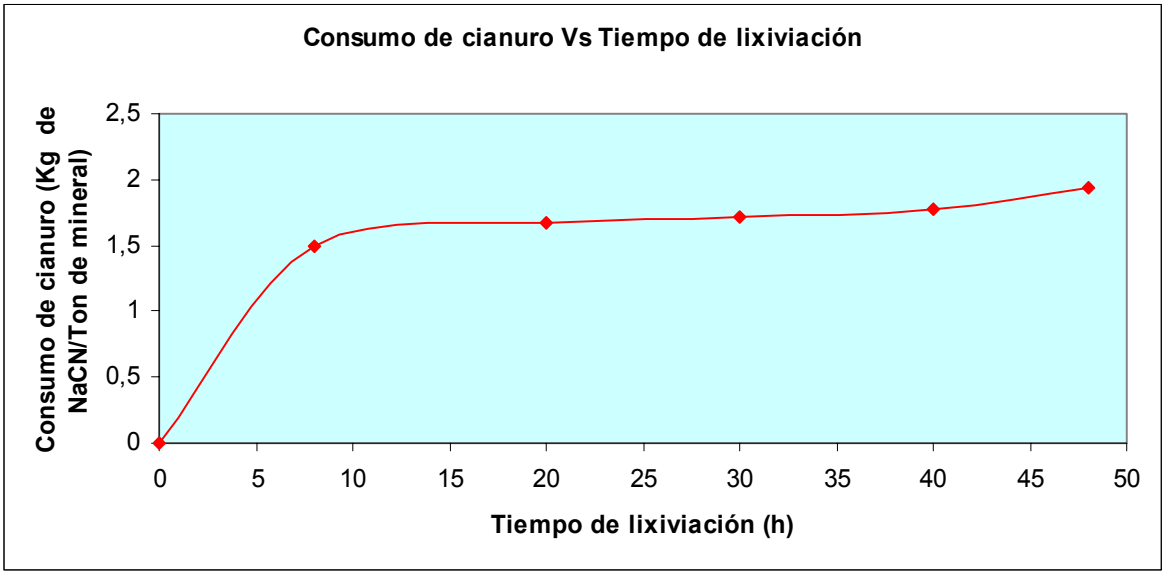


Figura 20. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral sin molienda de alta energía (MAu).

Tabla 10. Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 10 horas sin adición de cal (MN10).

Tiempo de lixiviación	Porcentaje de disolución de oro (%)	Consumo de cianuro (Kg de NaCN/Ton de mineral)
0	0	0
8	29,06	1,26
20	53,8	1,25
30	63,88	1,52
40	66,8	1,85
48	66,1	2,08

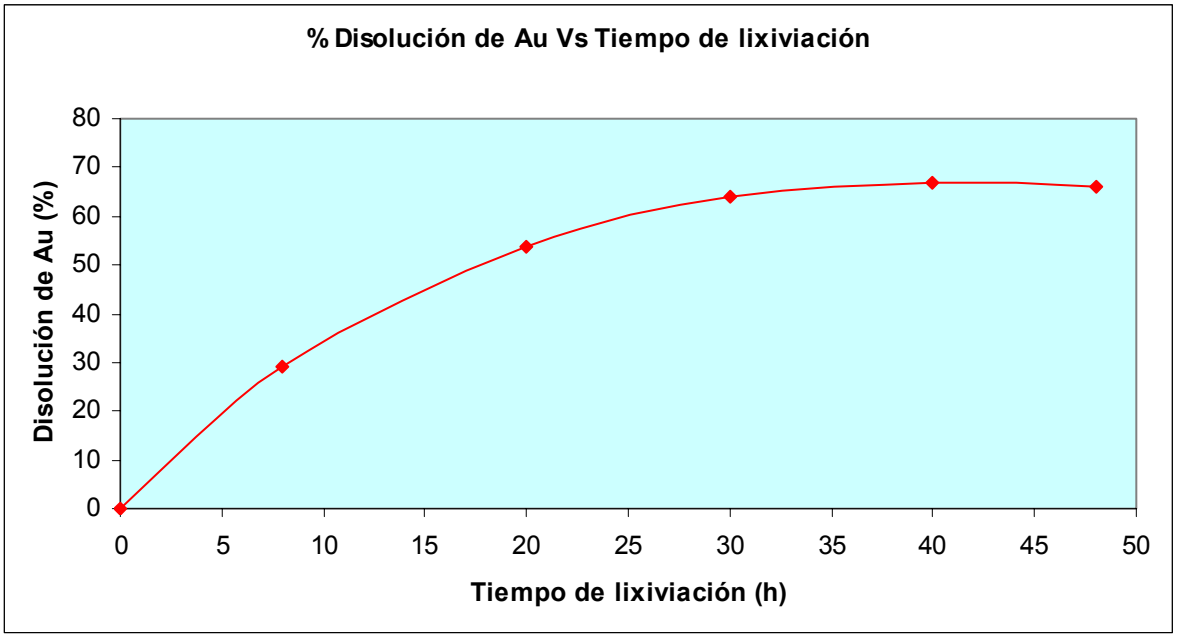


Figura 21. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 10 horas sin adición de cal (MN10).

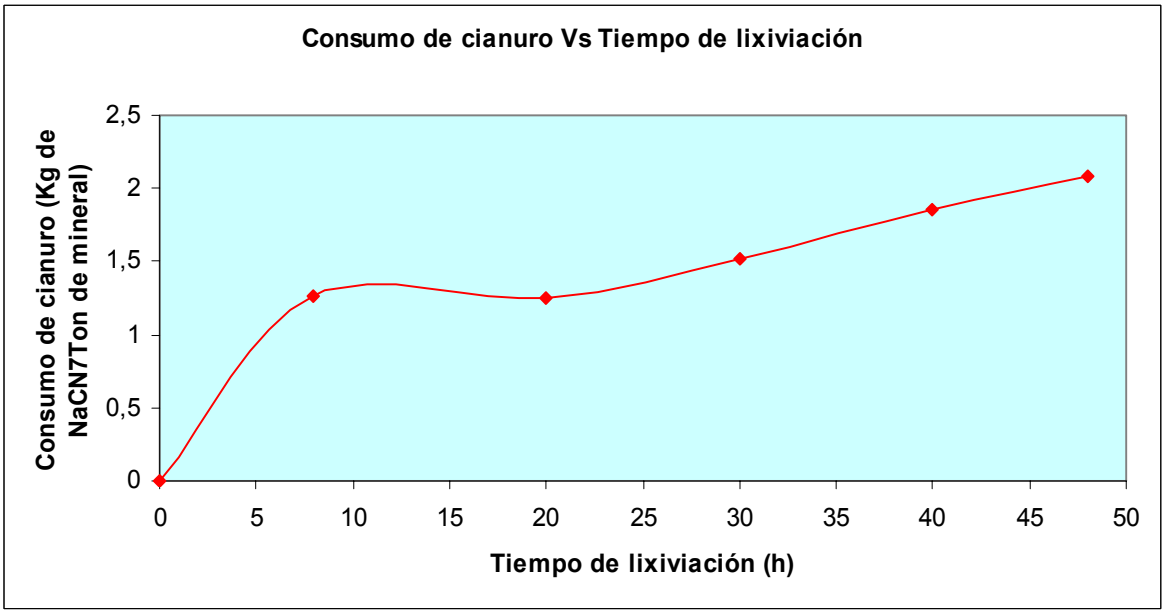


Figura 22. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 10 horas sin adición de cal (MN10).

Tabla 11. Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 10 horas con adición de cal (MC10).

Tiempo de lixiviación	Porcentaje de disolución de oro (%)	Consumo de cianuro (Kg de NaCN/Ton de mineral)
0	0	0
8	33,25	1,22
20	56,43	1,29
30	67,16	1,43
40	66,43	1,83
48	69,85	1,98

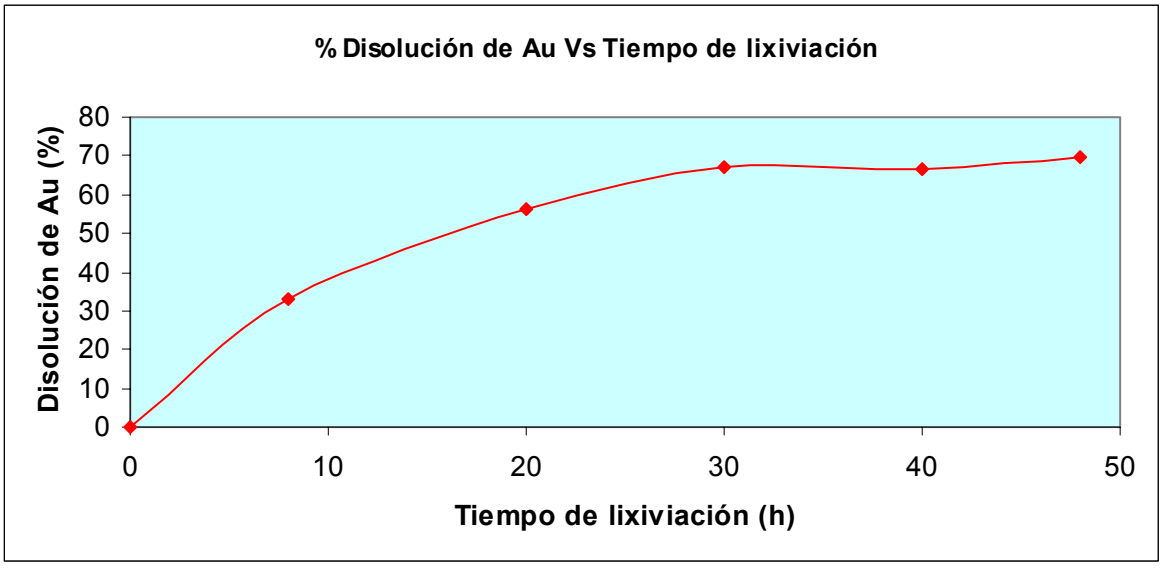


Figura 23. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 10 horas con adición de cal (MC10).

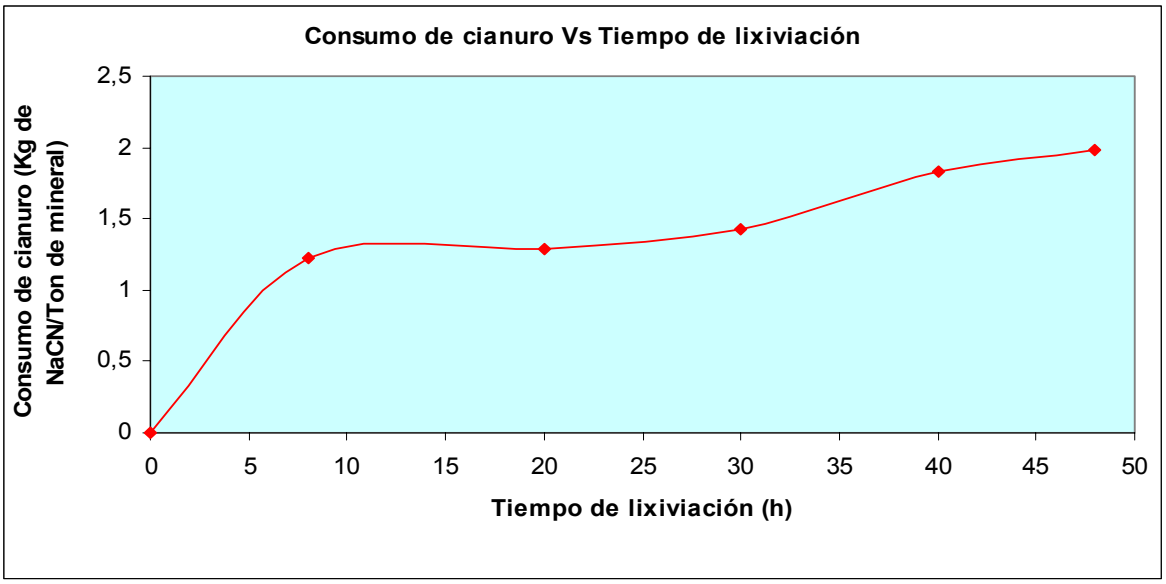


Figura 24. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 10 horas con adición de cal (MC10).

Tabla 12. Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 20 horas sin adición de cal (MN20).

Tiempo de lixiviación	Porcentaje de disolución de oro (%)	Consumo de cianuro (Kg de NaCN/Ton de mineral)
0	0	0
8	28,63	1,62
20	50,66	1,75
30	62,86	1,94
40	63,79	2,12
48	64,28	2,22

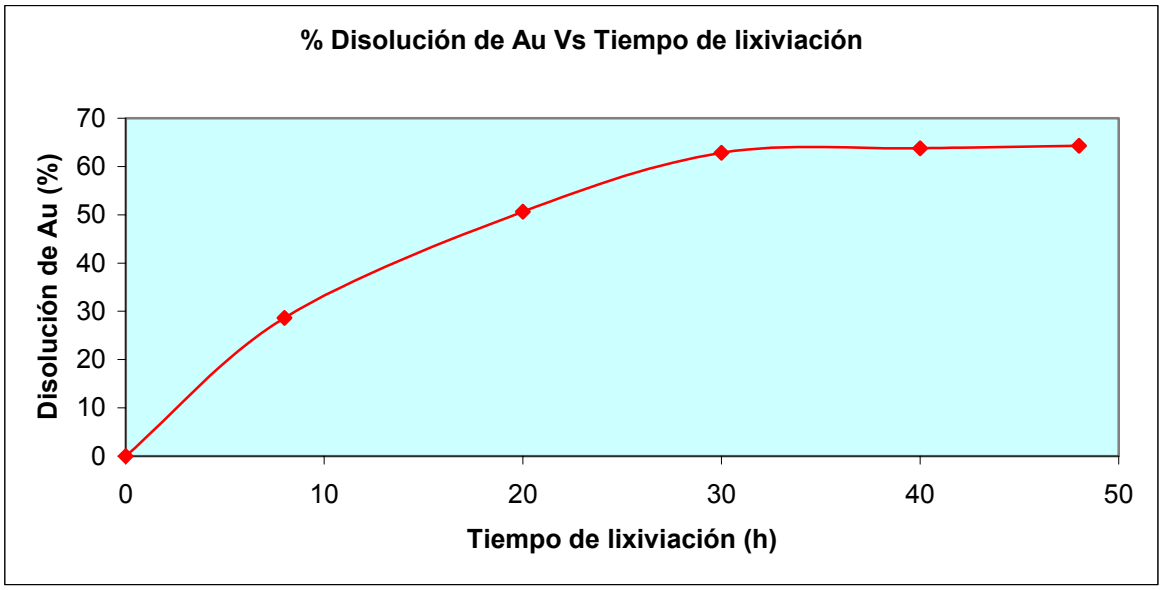


Figura 25. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 20 horas sin adición de cal (MN20).

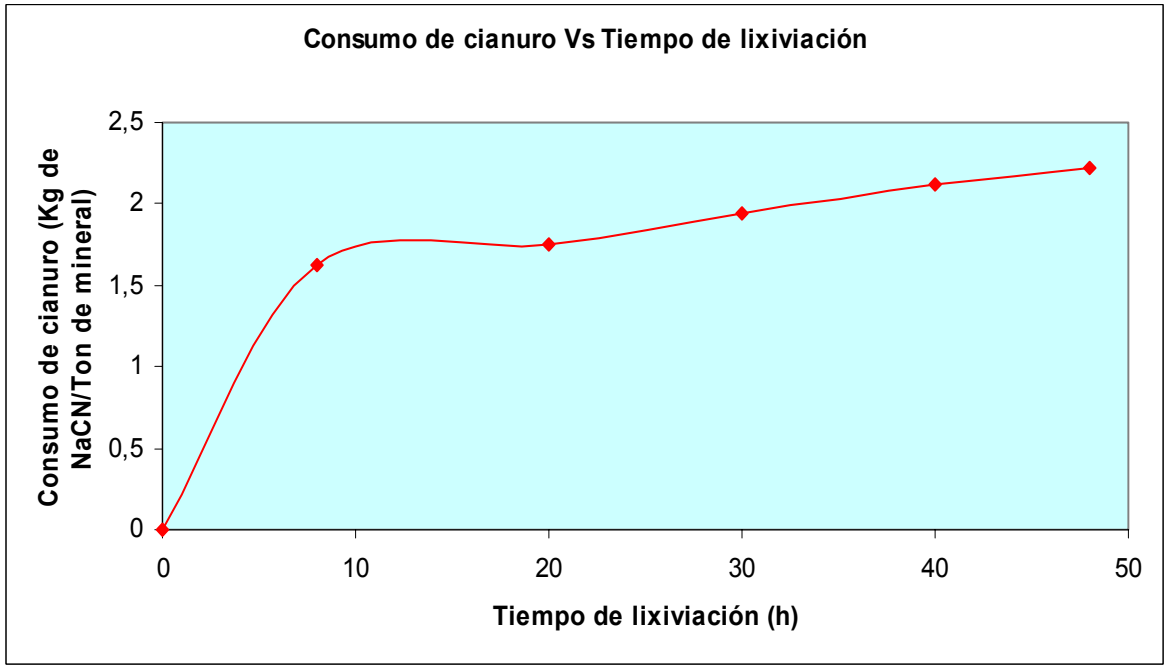


Figura 26. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 20 horas sin adición de cal (MN20).

Tabla 13. Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 20 horas con adición de cal (MC20).

Tiempo de lixiviación	Porcentaje de disolución de oro (%)	Consumo de cianuro (Kg de NaCN/Ton de mineral)
0	0	0
8	27,91	1,73
20	49,19	1,94
30	62,11	2,02
40	60,89	2,12
48	62,5	2,1

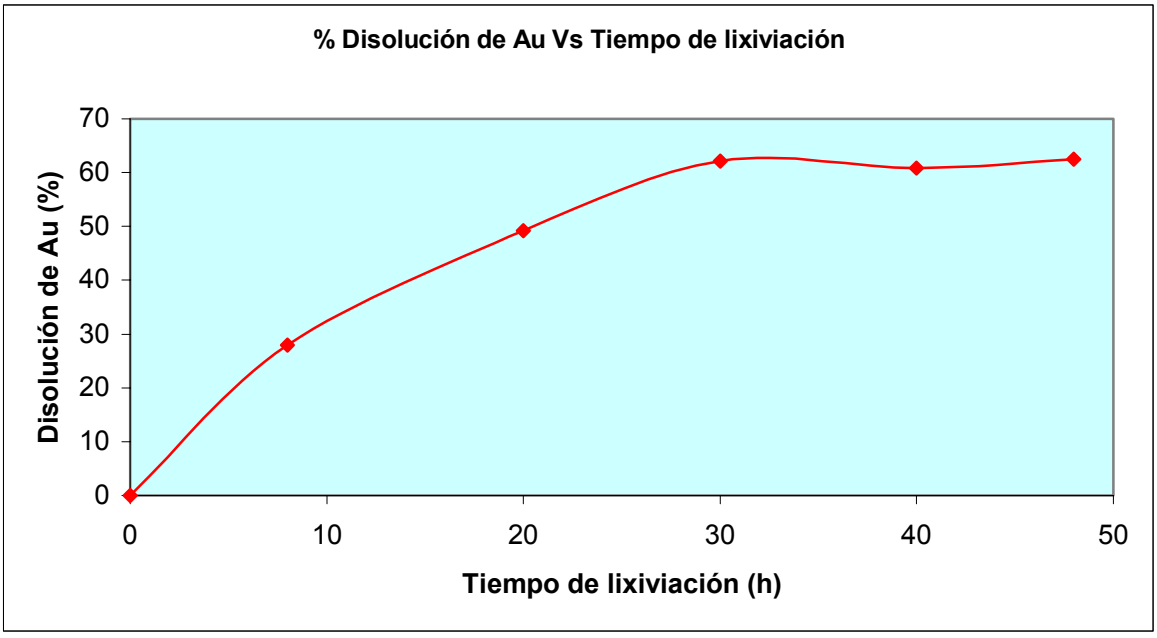


Figura 27. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 20 horas con adición de cal (MC20).

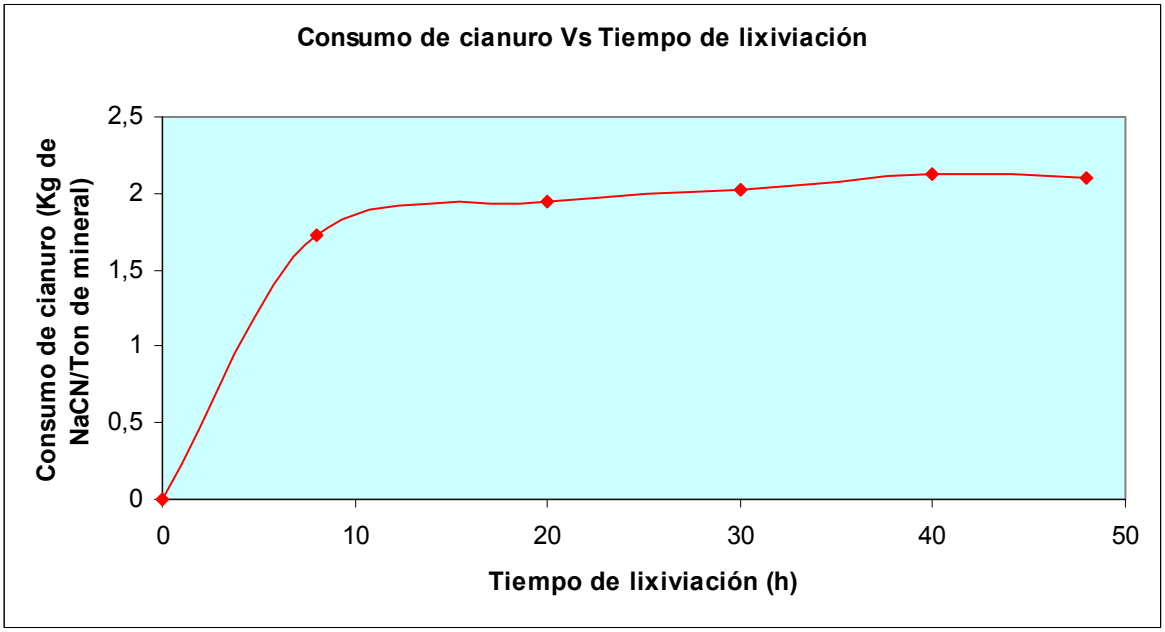


Figura 28. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 20 horas con adición de cal (MC20).

Tabla 14. Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 40 horas sin adición de cal (MN40).

Tiempo de lixiviación	Porcentaje de disolución de oro (%)	Consumo de cianuro (Kg de NaCN/Ton de mineral)
0	0	0
8	23,99	2,12
20	38,89	2,25
30	49,16	2,38
40	53,53	2,31
48	52,09	2,5

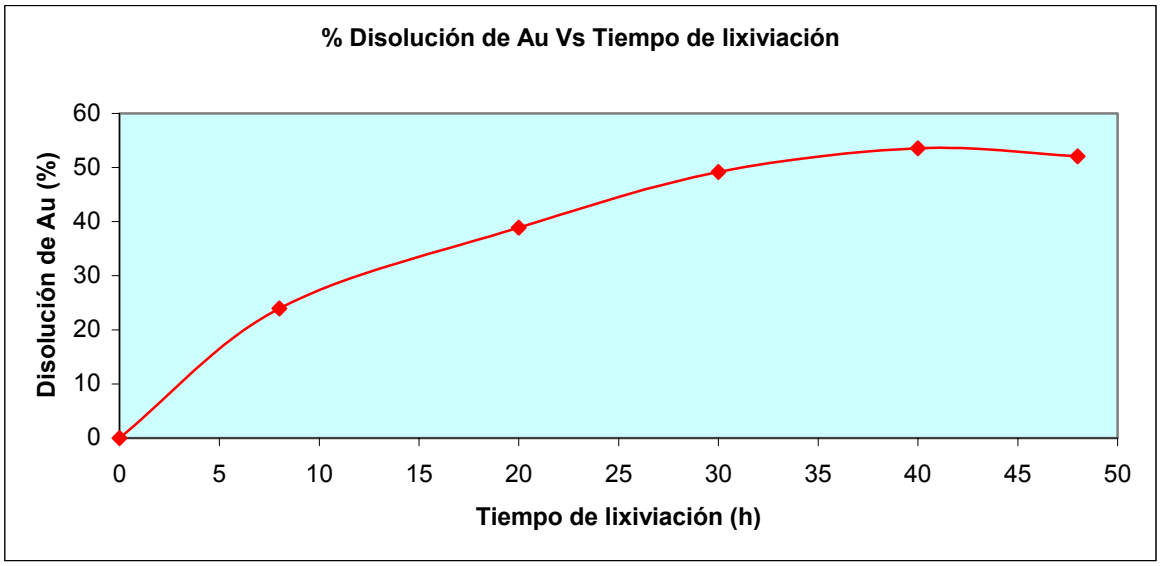


Figura 29. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 40 horas sin adición de cal (MN40).

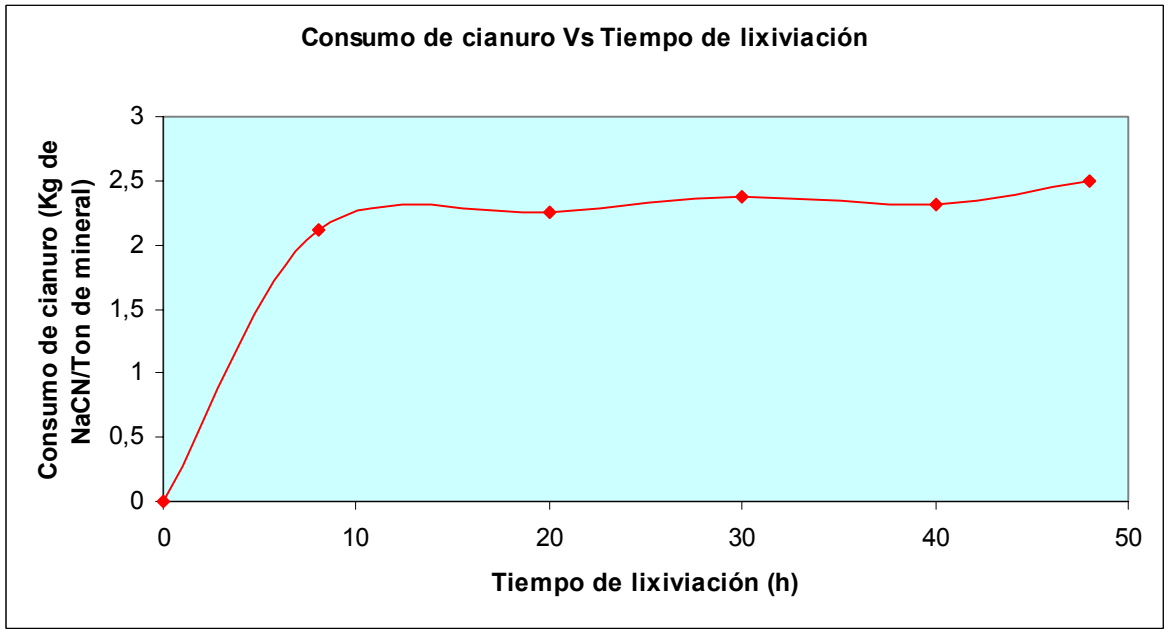


Figura 30. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 40 horas sin adición de cal (MN40).

Tabla 15. Porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 40 horas con adición de cal (MC40).

Tiempo de lixiviación	Porcentaje de disolución de oro (%)	Consumo de cianuro (Kg de NaCN/Ton de mineral)
0	0	0
8	21,34	1,75
20	33,02	2,03
30	45,6	2,24
40	48,82	2,37
48	49,49	2,6

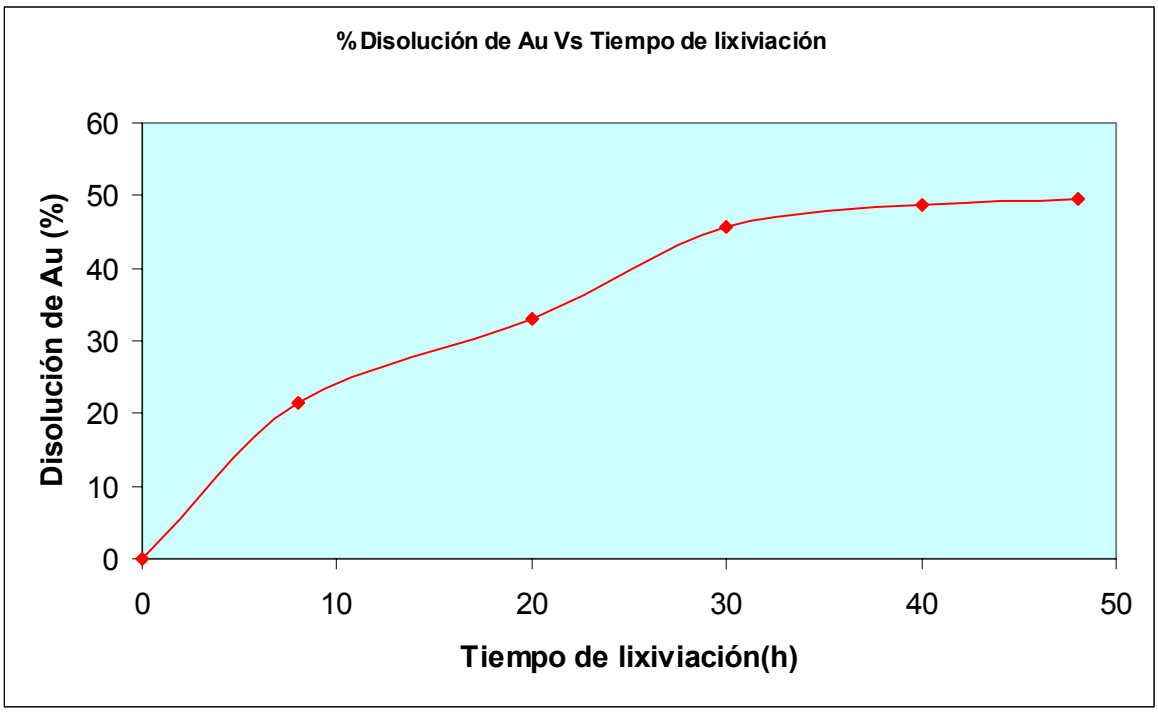


Figura 31. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 40 horas con adición de cal (MC40).

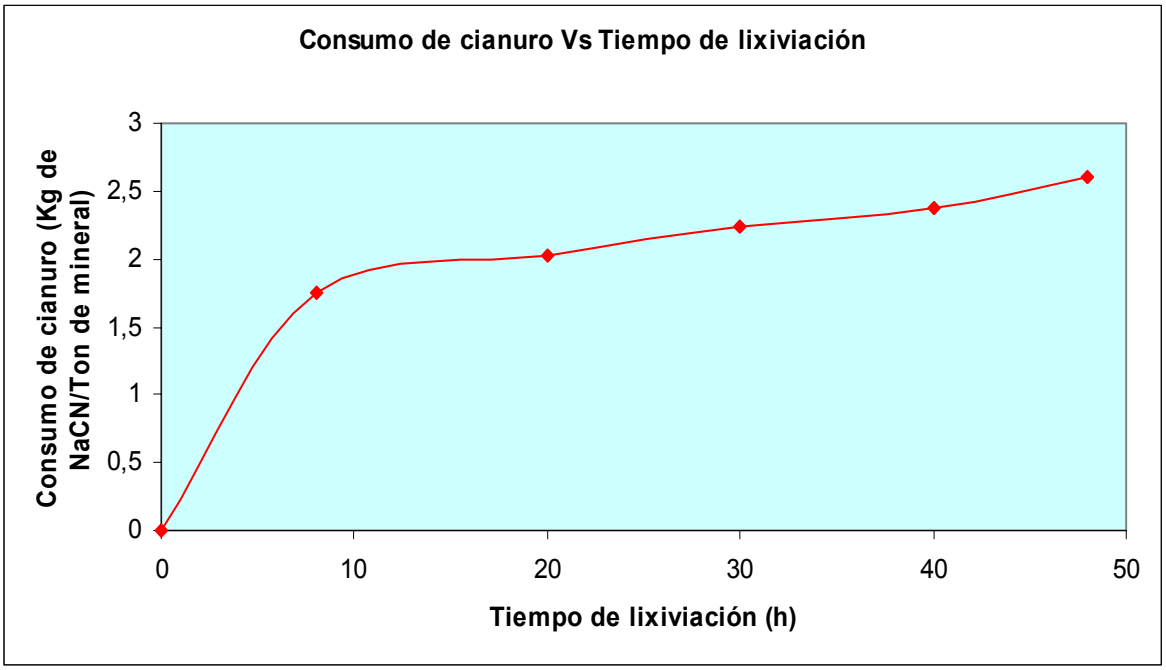


Figura 32. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para la muestra mineral moliendo por 40 horas con adición de cal (MC40).

Las tablas 16 y 17, junto con las figuras 33 y 34 presentan el resumen de los resultados obtenidos para el porcentaje de lixiviación y el consumo de cianuro.

Tabla 16. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación. Para muestras molidas con cal y sin cal y mineral sin molienda.

TIEMPO DE LIXIVIACIÓN	PORCENTAJE DE DISOLUCIÓN DE ORO (%)						
	MS: mineral sin molienda	MN10: mineral molido por 10 horas sin adición de cal	MC10: mineral molido por 10 horas con adición de cal	MN20: mineral molido por 20 horas sin adición de cal	MC20: mineral molido por 20 horas con adición de cal	MN40: mineral molido por 40 horas sin adición de cal	MC40: mineral molido por 40 horas con adición de cal
0	0	0	0	0	0	0	0
8	16,47	29,06	33,25	28,63	27,91	23,99	21,34
20	23,33	53,8	56,43	50,66	49,19	38,89	33,02
30	37,87	63,88	67,16	62,86	62,11	49,16	45,6
40	36,79	66,8	66,43	63,79	60,89	53,53	48,82
48	39,87	66,1	69,85	64,28	62,5	52,09	49,49

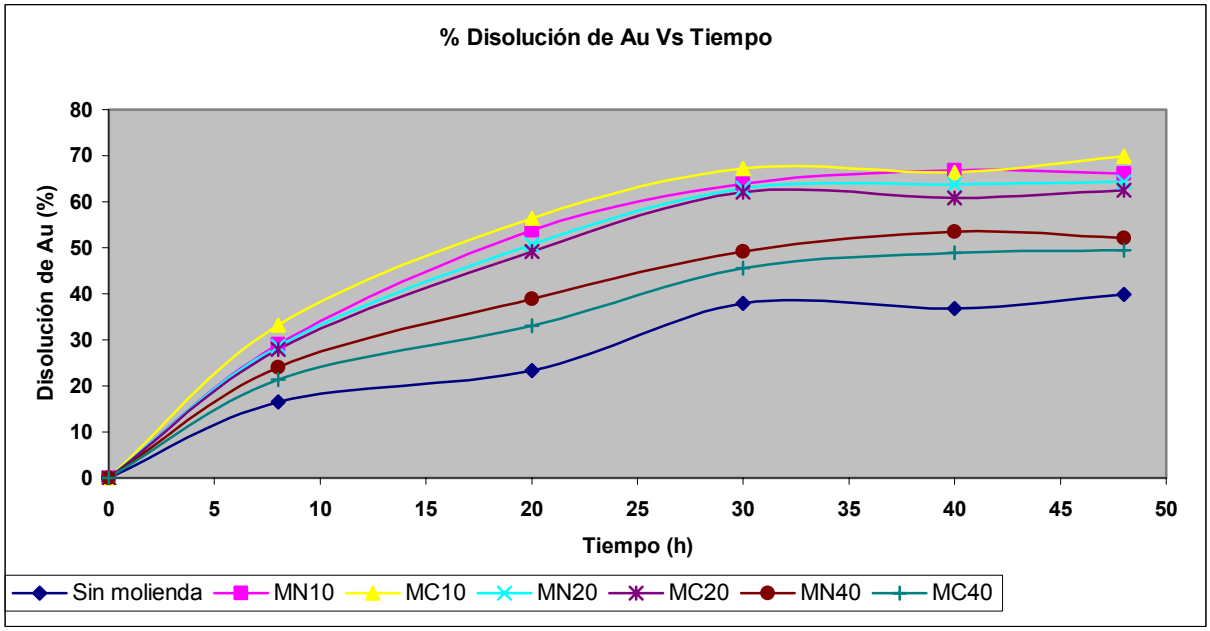


Figura 33. Porcentaje de disolución de oro Vs Tiempo de lixiviación.

Tabla 17. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación. Para muestras molidas con cal y sin cal y mineral sin molienda.

TIEMPO DE LIXIVIACIÓN	CONSUMO DE CIANURO (Kg de NACN/Ton de mineral)						
	MAu: mineral sin molienda	MN10: mineral molido por 10 horas sin adición de cal	MC10: mineral molido por 10 horas con adición de cal	MN20: mineral molido por 20 horas sin adición de cal	MC20: mineral molido por 20 horas con adición de cal	MN40: mineral molido por 40 horas sin adición de cal	MC40: mineral molido por 40 horas con adición de cal
0	0	0	0	0	0	0	0
8	1,5	1,26	1,22	1,62	1,73	2,12	1,75
20	1,67	1,25	1,29	1,75	1,94	2,25	2,03
30	1,72	1,52	1,43	1,94	2,02	2,38	2,24
40	1,78	1,85	1,83	2,12	2,12	2,31	2,37
48	1,94	2,08	1,98	2,22	2,1	2,5	2,6

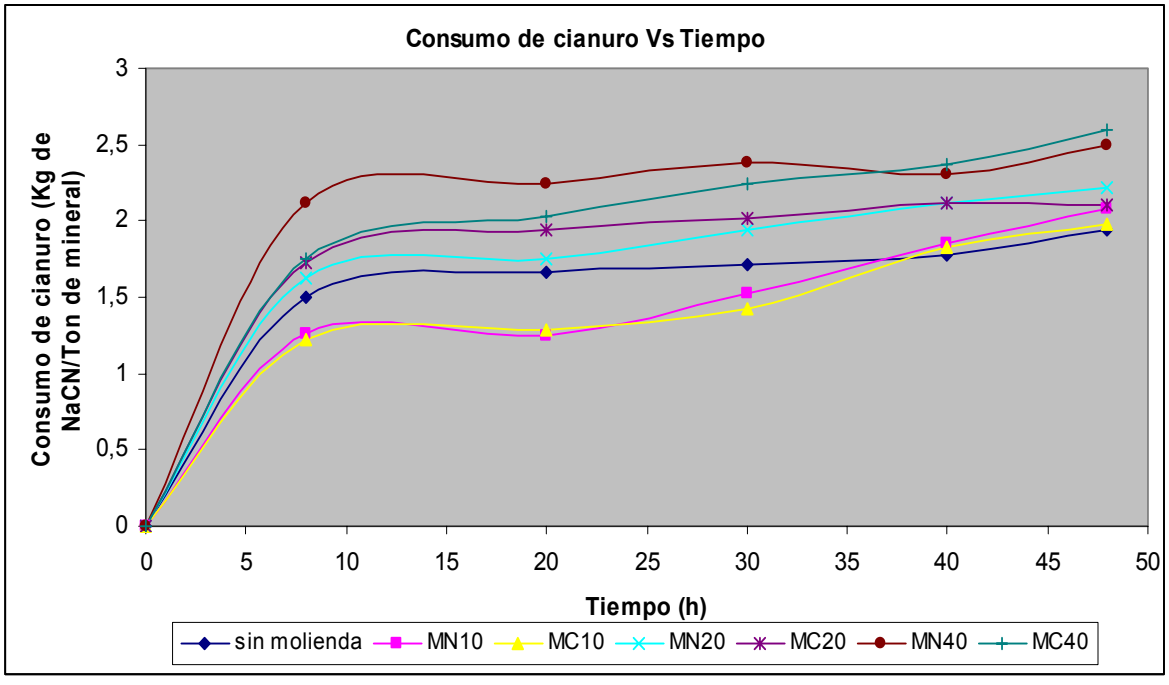


Figura 34. Consumo de cianuro Vs Tiempo de lixiviación.

3.3.2.1 Ensayo al fuego de las colas de lixiviación de las muestras con y sin molienda.

Las colas de la lixiviación se sometieron a ensayo al fuego, con el propósito de calcular la ley final de éstas. Con este dato y la ley inicial calculada al mineral original, se obtuvo el porcentaje de disolución, resultados que al confrontarlos con los obtenidos por espectrofotometría de absorción atómica muestran un buen grado de concordancia.

Tabla 18. Resultados del ensayo al fuego a las colas de lixiviación y calculo del porcentaje de disolución total.

MUESTRA	LEY INICIAL (g de Au/Ton de mineral)	LEY FINAL (g de Au/Ton de mineral)	PORCENTAJE DE DISOLUCIÓN (%) $\left[\left(Ley\ inicial - Ley\ final \middle/ Ley\ inicial \right) * 100\right]$
MAu	36,66	24,33	33,64
MN10		15	59,08
MC10		13,67	62,71
MN20		15,66	57,28
MC20		15,33	58,18
MN40		16,33	55,46
MC40		16,67	54,53

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. *MOLIENDA MECÁNICA*:

Considerando los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas a la muestra sin molienda y a aquellas que fueron expuestas a molienda mecánica , tales como DRX, infrarrojo, termogravimetría, fotosedimentación y cianuración, se hace evidente que la molienda induce en las partículas del mineral cambios de tipo físico-químico y cristalográficos, reflejados en la disminución del tamaño de grano, aumento de la reactividad química, cambios en los sistemas cristalinos y desaparición o amorfización de fases presentes en el mineral.

El análisis granulométrico por fotosedimentación (Ver anexos C) realizado a las muestras expuestas a diferentes tiempos y condiciones de molienda, evidenció el efecto conminutivo sobre el tamaño de grano del mineral, ocasionando aumentos tanto en el área superficial como en la reactividad química. Así mismo se observó el alto nivel de fracturamiento que sufrido por el mineral obteniéndose en la molienda tamaños de partículas menores a 50μm, lo cual permite suponer la disminución en la refractariedad a causa de la liberación de oro encapsulado. Estas observaciones fueron corroboradas mediante análisis visual. También se pudo establecer que la relación tiempo de molienda a tamaño de partícula obtenido no es uniforme para todas las muestras y, además, comprueba que tiempos mayores a 10 horas de molienda serian antieconómicos, debido a que períodos superiores no reflejan cambios significativos en el tamaño de partícula. Aún mas se observaron casos en los cuales a mayor tiempo de molienda hay mayor tamaño de grano, efecto que muy posiblemente se debe a que, así como la molienda mecánica puede conminuir, también se pueden presentar fenómenos de aglomeración, agregación, o recristalización.

Los resultados obtenidos en los análisis de difracción de rayos X e infrarrojo (figura 12 a la 16) permiten observar amorfización de la jarosita y la ortoclasa, desaparición de la moscovita, estabilidad del cuarzo y, alteraciones en la estructura cristalina de la pirita cambiando de triclínico a cúbico. Así mismo, éstos resultados permiten evaluar el efecto de la variación del pH de molienda, por adición de cal, probablemente retardando la amorfización de algunas fases pero sin ninguna incidencia apreciable sobre las demás especies.

En la Figura 17, se observan los termogramas de las muestras analizadas, en las cuales se aprecia que el mineral molido con relación al original, presenta mayores pérdidas de peso durante el lapso de calentamiento, lo cual está directamente relacionado con los efectos de la molienda, principalmente con la granulometría.

Los cambios anteriormente descritos, inducidos por la molienda mecánica, podrían considerarse como factores influyentes en el proceso de lixiviación del mineral.

Por otra parte, la curva termogravimétrica del mineral original sin molienda presenta dos perdidas abruptas de peso, a 430 y 890 ºC, aproximadamente, las cuales no se presentan en la curva del mineral molido. Estos pueden estar asociados con cambios estructurales de la sílice y de los carbonatos y evidencian una vez más que la molienda de alta energía tiene grandes efectos sobre la naturaleza mineralógica.

Teniendo en cuenta que en los minerales refractarios de oro el efecto disolvente del cianuro está prácticamente limitado al oro libre, los resultados de la cianuración obtenidos en este trabajo evidencian que la molienda de alta energía tiene un efecto de liberación, aumentando el oro lixiviable en la muestra y por lo tanto mejorando la acción disolvente del cianuro.

4.2. LIXIVIACIÓN

4.2.1 Análisis de los resultados de la lixiviación de diagnóstico.

Los resultados obtenidos en la lixiviación de diagnóstico muestran que la mayor parte de oro presente se encuentra asociado con pirita, arsenopirita y marcasita, seguido de la proporción de oro libre, (figura 18); la otra fracción de oro corresponde al asociado con silicatos, pirrotita, ferrita, galena, urarinita, etc. Aún cuando de antemano se sabía de la presencia de oro asociado, la lixiviación de diagnóstico mostró que el grado de asociación es muy alto, en este caso 73%, valor que sobrepasó todas las predicciones. Así mismo, demostró que la característica fundamental de este mineral es el de ser esencialmente piritoso.

La información suministrada por este ensayo respecto al grado de asociación y la característica piritosa del mineral, permite corroborar la alta refractariedad de la mena, lo cual conlleva a la dificultad para recuperar mediante procesos convencionales de cianuración este porcentaje de oro asociado. De tal forma, permite prever que con un tratamiento convencional de este mineral se obtendrían bajos porcentajes de extracción de oro, con la posibilidad de no ser viable económicamente. Un ejemplo claro de esta situación se encuentra en la zona minera aurífera de Vetas y California del departamento de Santander.

4.2.1 Análisis de los resultados de las pruebas de cianuración.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la cianuración del mineral original, y que los minerales de oro pueden clasificarse según el grado de lixiviabilidad respecto al oro disuelto de ellos, como se observa en la Tabla 19, se puede entrever el gran efecto de la molienda mecánica, ya que logró que el mineral, el que en un comienzo se clasificó como difícilmente lixiviable, después de ser molido, en algunos casos se comportara como medianamente lixiviable.

Tabla 19. Clasificación de minerales de oro según grado de lixiviabilidad

Porcentaje de Disolución	Clasificación Según Grado de Lixiviabilidad
< 65 %	Difícilmente Lixiviable
65 – 85 %	Medianamente Lixiviable
> 85 %	Altamente Lixiviables

Fuente: Albert, T. General online heap leach testwork. Kappes, Casiday and Associates. USA.

Un análisis más profundo de los resultados obtenidos para las muestras cianuradas de la Tabla 16 y la figura 16, evidencia un aumento considerable en el porcentaje de disolución de oro, respecto a la muestra sin molienda (39,87%). Durante la lixiviación se alcanzó un valor máximo de 69,85% de oro disuelto registrando para el mineral molido por 10 horas con adición de cal (MC10) y lixiviado por 48 horas. Las demás muestras también presentaron valores de disolución de oro mayores al obtenido en la muestra original (MAu), pero menores al alcanzado en la muestra MC10. Este aumento en la disolución evidencia la disminución en el grado de refractariedad del mineral como consecuencia de la molienda aplicada a éste.

Así mismo, cabe destacar que todas las muestras molidas presentaron mayor consumo de cianuro respecto a la muestra sin molienda. Entre ellas el menor consumo se registra en la MC10, la cual presentó un valor de 1,98 Kg de NaCN/Ton de mineral, siendo muy cercano al valor registrado para la muestra original, de 1.94 Kg de NaCN/Ton de mineral.

Tomando en cuenta las dos muestras que fueron molidas por 10 horas, una de ellas con adición de cal (MC10) y la otra en su pH natural (MN10), se observa que los resultados de porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro no

presentan diferencias significativas, lo cual permite intuir que la incidencia de la cal sobre éstos parámetros es nula o poco apreciable. Este mismo comportamiento se aprecia para las muestras con 20 y 40 horas de molienda.

El análisis de las gráficas obtenidas de la cianuración, comprueba que para todas las muestras el porcentaje de disolución de oro y consumo de cianuro aumentan al aumentar el tiempo de lixiviación. En el caso de la disolución de oro, éste valor aumenta significativamente hasta las 30 horas de lixiviación, tiempo a partir del cual tiende a estabilizarse, lo cual permite concluir que tiempos mayores de cianuración son innecesarios.

Lo consignado en los párrafos anteriores indica que para lograr un aumento significativo en el nivel de disolución de oro, manteniendo a su vez un bajo consumo de cianuro, el tiempo óptimo de molienda mecánica y lixiviación son de 10 y 30 horas respectivamente. De igual manera, cabe recordar que para este tiempo de molienda se obtuvieron los mejores resultados respecto a la granulometría final.

La molienda mecánica, como se explicó anteriormente, aumenta los niveles de disolución de oro, pero la relación tiempo de molienda a porcentaje de disolución no muestra una tendencia uniforme a aumentar, observándose casos donde a mayor tiempo menor disolución y, además, ocasiona aumentos en el consumo de cianuro. Estos efectos probablemente se deben al aumento de la reactividad química, liberación de elementos cianicidas, transformación o pasivación de los minerales contenedores de oro y la granulometría. Cabe anotar que contrario al porcentaje de disolución, la relación tiempo de molienda a consumo de cianuro sí mantiene una relación homogénea, mostrando que a mayor tiempo de molienda mayor consumo de cianuro.

Durante la realización del ensayo al fuego a las colas de lixiviación hubo la necesidad de encuartar lo cual indica la presencia de bajos niveles de plata. Por el contrario, esto no se presentó en el mineral sin molienda, lo cual permite suponer que así como la molienda aumenta la disolución de oro, ejerce este mismo efecto sobre la plata.

Todo los resultados permiten afirmar, que en efecto, la exposición del mineral refractario de oro a molienda mecánica de alta energía aumenta su reactividad química, puesto que el mecanismo de conminución, no sólo causa la disminución en el tamaño de las partículas, sino que muy probablemente también induce, amorfiza o destruye fases, induce defectos estructurales que distorsionan las redes cristalinas, y por lo tanto crea sitios energéticamente favorables para que ocurra la reacción de disolución de oro.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados de la lixiviación de diagnóstico, el mineral en estudio presentó un alto grado de refractariedad, siendo muy adecuado para su uso en esta investigación. La refractariedad del mineral es principalmente de tipo físico debido al alto grado de asociación del oro (73%) y al tipo de minerales a los cuales se encuentra asociado (pirita, arsenopirita, etc.). Sin embargo, no es descartable, la presencia de refractariedad de tipo químico por efecto de la acción de elementos cianicidas.

- Se concluye que la lixiviación de diagnóstico es una herramienta muy valiosa, puesto que permite determinar la asociación que puede existir entre las partículas de oro y ciertos minerales y además, explicar el comportamiento de éste durante los procesos de beneficio.

- La disolución por cianuración del mineral refractario estudiado, mostró aumentos considerables como consecuencia de su exposición a la molienda mecánica de alta energía. El mayor porcentaje de disolución de oro (69,85 %) se registró en la muestra molida por 10 horas con adición de cal (MC10) y lixiviada durante 48 horas, lo cual representa un aumento del 29,98% respecto a la muestra del mineral que no fue sometido a molienda mecánica.

- Los tiempos adecuados de molienda y lixiviación son 10 y 30 horas respectivamente, ya que lapsos superiores a éstos no evidencian aumentos significativos en el porcentaje de disolución de oro, sino que por el contrario, implican mayor consumo de energía y cianuro, siendo inviable económicamente.

- De acuerdo con los tiempos obtenidos, la adición de cal como agente modificador de pH de molienda, posiblemente disminuye la amorfización de fases presentes en el mineral de oro tales como la jarosita, moscovita y ortoclasa, sin tener ningún efecto significativo sobre las demás fases analizadas. Además, su incidencia sobre los porcentajes de disolución no fue apreciable.

- La molienda mecánica de alta energía se presenta como una alternativa adecuada y eficaz en el pretratamiento de minerales refractarios de oro, ya que permite la obtención de altos grados de disolución con bajo consumo de cianuro, logrando que la extracción del metal precioso mediante cianuración convencional sea más viable económicamente en esos minerales.

RECOMENDACIONES

Con el fin de que la investigación en esta área del procesamiento de minerales tenga continuidad, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Teniendo en cuenta que la molienda de alta energía aplicada al procesamiento de minerales auríferos es nueva, se recomienda realizar investigaciones adicionales en las cuales las condiciones que en este trabajo se mantuvieron constantes se tomen como variables, tales como la relación peso de bolas/ peso de mineral, atmósfera de molienda (vía seca o húmeda), diámetro y tipo de medios moledores, tipo de molino, etc., con el fin de que se comprenda en mayor medida el efecto de la molienda mecánica de alta energía en el pretratamiento de estos minerales. Así mismo se sugiere el desarrollo de un análisis estadístico.

- Con base en los buenos resultados obtenidos en este trabajo se recomienda realizar estudios que permitan evaluar la viabilidad de implementar esta técnica a nivel industrial, de tal forma que sea una alternativa para mejorar las actuales condiciones de la minería colombiana.

- Realizar estudios en los cuales el mineral pretratado, se someta a diferentes tipos de lixiviación, tomando muestras periódicas para poder efectuar un estudio cinético completo, que permita establecer las condiciones óptimas para lograr el mayor grado de disolución.

- Teniendo en cuenta la importancia que reviste el uso de la cal en la molienda mecánica de alta energía como posible agente desulfurante, en

nuevas investigaciones sería conveniente realizar un seguimiento más profundo de sus efectos sobre el mineral.

- Para el conocimiento más detallado de las consecuencias de la molienda, se plantea desarrollar trabajos en los cuales, no solo se haga un seguimiento del oro, sino que además se evalúen los efectos sobre elementos tales como la plata, cobre e hierro, entre otros.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Arias Arce, Vladimir. Tecnologías de refinación de los metales preciosos. Ediciones Grezzley E.I.R.L. 1ª edición, Lima-Perú. 1996.

2. Gallardo, Juan Vargas. Metalurgia del oro y la plata. Editorial San Marcos, 2a edición, Lima-Perú, 1990.

3. Pénate Zúñiga Yesid Alberto. Desarrollo de correlaciones entre mineralogía y extracción de oro en minerales auríferos mediante datos de lixiviación diagnóstico. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Metalúrgica. 2004.

4. Santos Sobral Luis Gonzaga. Tecnología actual de los procesos de recuperación de oro y plata. Instituto Colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología Francisco José de Caldas, Colciencias. 1994.

5. Angel Azañero Ortiz; Pablo Nuñez Jara; Victor Vega Guillén; Manuel Caballero Ríos; José Vidarte Merizalde. Cómo mejorar la extracción de oro en lixiviación en montón. Departamento Académico de Ingeniería Metalúrgica – FGMMCG – UNMSM. Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr vol.3 no.5 Lima June 2000.

6. LORENZEN, Leon. Some guidelines to the desing of a diagnostic leaching experiment. Minerals Engineering, vol. 8, 1995. Elsevier.

7. Gutiérrez Pérez Denis Nathalia. Disolución de la ilmenita ($FeTiO_3$) proveniente de arenas negras, inducida por molienda de alta energía.

Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. 2004

8. C. Suryanarayana. “Mechanical alloying and milling”. Progress in Materials Science, 46. 2001.

9. www.fomaas.de/ProjectsFrameMain007.htmMechanicallAlloying

10. P. Baláz. “Mechanical activation in hydrometallurgy”. Internacional journal of mineral processing, 2003. Elsevier.

11. ZO, Ana. Informe geológico “Mejoramiento de los procesos de beneficio de minerales auríferos en los municipios de Vetas y California”. Grupo de Investigación en minerales, biohidrometalurgia y ambiente, UIS. 2002.

12. NARVAEZ, Martín. Informe geológico Minercol – Alcaldía de Santa Rosa del Sur (Bolívar).

13. GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MINERALES BIOHIDROMETALURGIA Y AMBIENTE, UIS. Informe final “Mejoramiento de los procesos de beneficio de metales preciosos en el Sur de Bolívar”. UIS, 2002.

14. PETRUK, W. Mineralogical evaluations of gold recoveries by extractive metallurgy techniques. Process mineralogy. New York, Edit.Richard Hagni, 1995.

15. PETRUK, W. Some relationship between mineral textures and extractive metallurgy process mineralogy. New York, Edit. Hagni, 1995.

16. VAN DEVENTER, Jani.S. The interrelationship between mineral liberation and leaching behaviour. Mineral Processing, Vol. 41, 1994.

17. PETERSEN, K. The use of neural network analysis of diagnostic leaching data. University of Stellenboch, South Africa, 1995.

18. SOCIETY OF MINING ENGINEERS, AIME. Mineral processing handbook. New York,1985.

19. KAUTZMAN Y MILTZAREK. Tratamiento de minerios. CETEM 1998.

20. SOCIETY OF MINING ENGINEERS, AIME. Mineral processing handbook. New York,1985., pag. 13 – 25.

21. LORENTZEN, Leon Y ANNANDALE, G. Interrrelationship between mineral liberation and leaching behaviour of refractories ores, ICAM 1996.

22. PAPANGELAKIS, Vladimiros. Leaching of ores: Chemestry and kinetics. University of Toronto, 1999.

23. SZEKELY, Julian. Gas solid reactions. Plenum press. 1979.

24. LORENTZEN, Leon y ANNANDALE, G. Interrrelationship between mineral liberation and leaching behaviour of refractories ores. Dpt. Of chemical Engineering, University of stellenbosch (Southafrica), 1996.

25. CÁRDENAS, Agustín. Metalurgia extractiva del oro. Bolivia: imprenta offset “Imral” ltda., 1990.

26. HABASHI, Fathi. Principles of extractive metallurgy. New York, Gordon and Brench, 1960.

27. GARCÍA, Ismael. Importancia de la metalúrgica teórica en el desarrollo de proyectos de investigación tecnológica en metalurgia extractiva. Tesis de grado de maestría en Ingeniería Metalúrgica, UIS, 1999. Bucaramanga.

28. LÓPEZ, María Esperanza. La mineralogía de procesos y su aplicación en la cianuración de los minerales auroargentíferos. Tesis de Grado de Maestría en Ingeniería Metalúrgica, UIS, 1999, Bucaramanga.

29. WADSWORTH, Milton E. Rate processes of extractive metallurgy. New York, Plenum press, 1979.

30. GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MINERALES, BIOHIDROMETALURGIA Y AMBIENTE, UIS. Diagnóstico preliminar del procesamiento de minerales auroargentíferos en el asentamiento minero de San Pedro Frío y su área de influencia, 2001.

31. ANNANDALE, G. J. Neural net analysis of the liberation of gold using diagnostic leaching data. Mineral Engineering, vol. 9, 1996. Elsevier.

32. TUMILTY, J. A. Diagnostic leaching in the development of flowsheets for new ore deposits. International symposium of gold metallurgy Canada, 1987.

33. INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. Minería Química. 1991.

34. HAUSEN, D. Characterizing the textural features of gold ores for optimizing gold extraction. Journal of mining, Vol. 52, pag. 14. Abril 2000. New York.

35. RONG – YU WAN. Importance of metallurgical research on refractory gold ore processing. Mining Engineering, Vol 53, pag. 41, Noviembre 2001, littleton.

36. CASTROVIEJO, R. Microscopic digital image of gold ores: A critical test of methodology mineral and metallurgical processing. Vol 19, pag 102. Mayo 2002, littleton.

37. CHEN, T. Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues. Journal of mining, Vol 54, pag 20, diciembre 2002. New York.

38. www.scirus.com
Palabras claves: infrared and gold
link: Process mineralogy of bacterial oxidized gold ore in São Bento Mine (Brasil)

39. www.scirus.com
Palabras claves: infrared and orthoclase
link: Infrared spectroscopy in the mineralogical characterization of ancient pottery

ANEXO A

DIFRACTOGRAMAS Y ANALISIS SEMICUANTITATIVO: MUESTRA ORIGINAL Y CAL UTILIZADA EN EL PROCESO DE MOLIENDA.

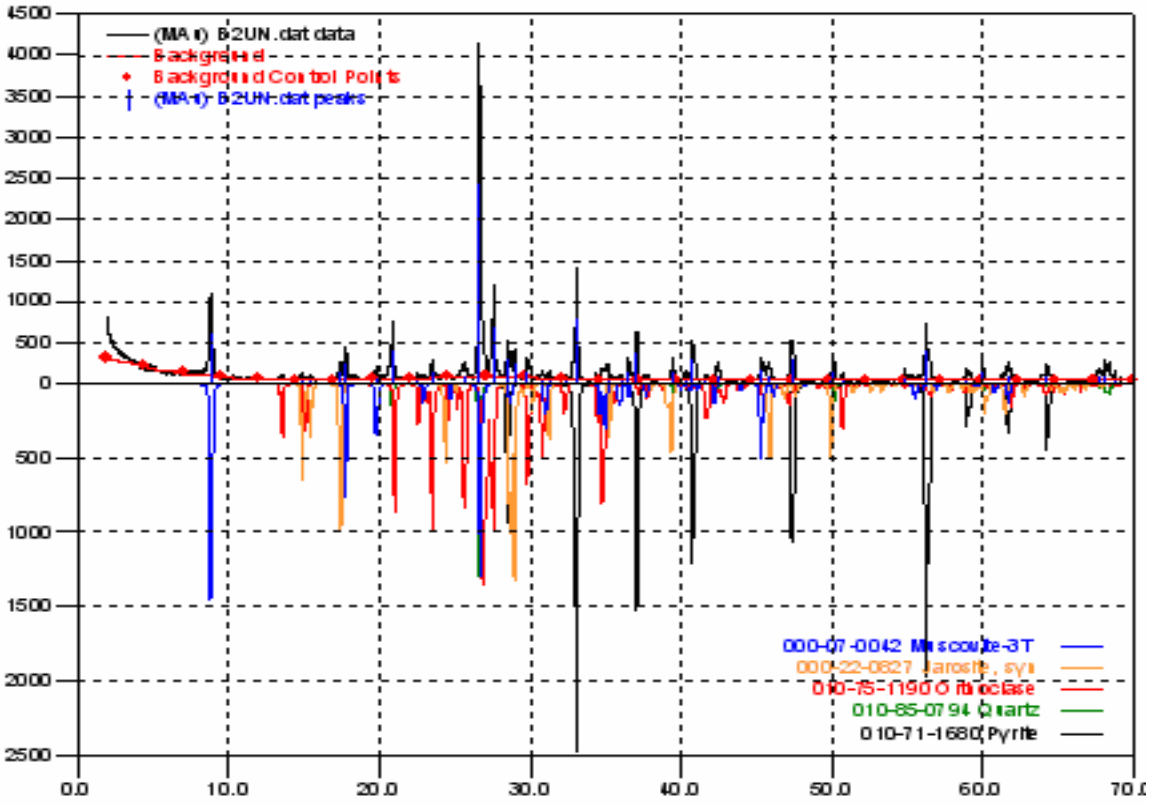


Figura A.1 Muestra original

Tabla A.1 Análisis semicuantitativo

FASE	NOMBRE	PORCENTAJE SEMICUANTITATIVO (%)
FeS_2	Pirita	6.72
SiO_2	Cuarzo	90.88
$K\ (\ Al\ Si_3\ )\ O_8$	Ortoclasa	2.39
$K\ Fe_3\ (\ S\ O_4\ )_2\ (\ O\ H\ )_6$	Jarosita	-
$(\ K\ ,\ Na\ )\ (\ Al\ ,\ Mg\ ,\ Fe\ )_2\ (\ Si_{3.1}\ Al_{0.9}\ )\ O_{10}\ (\ O\ H\ )_2$	Moscovita	-

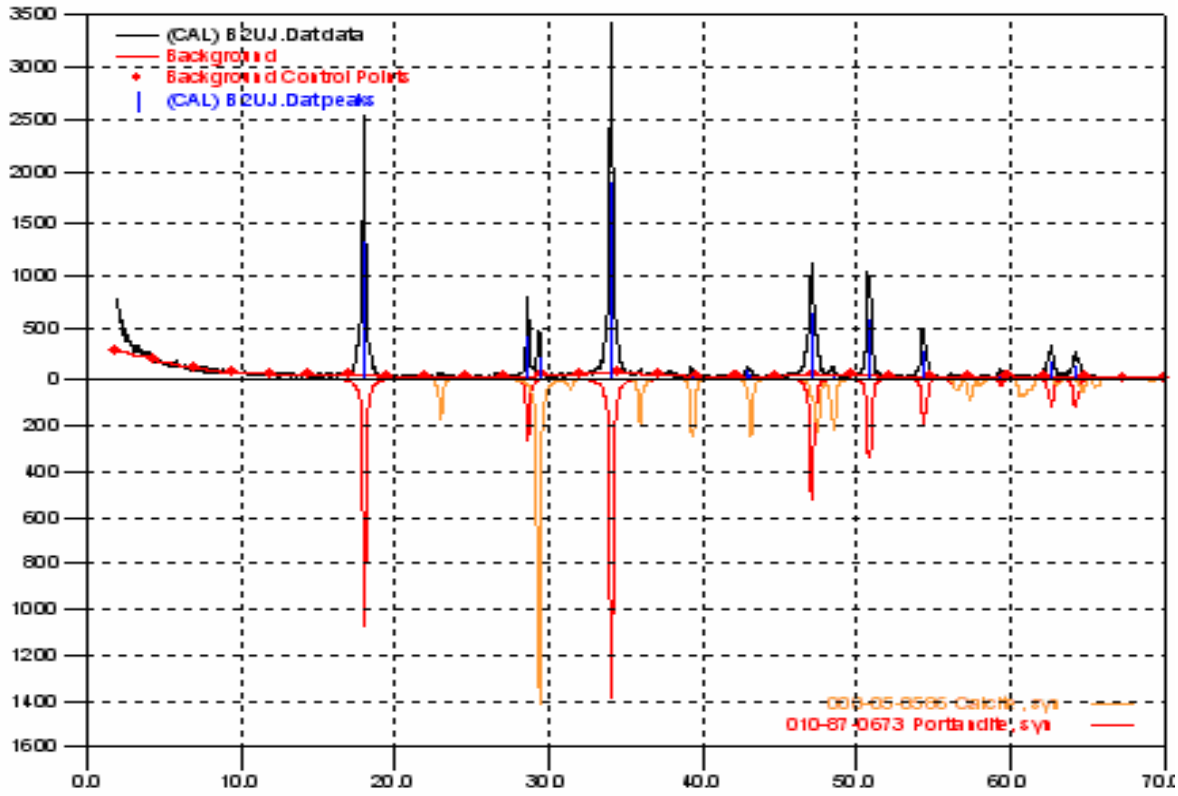


Figura A.1 Muestra de cal

Tabla A.1 Análisis semicuantitativo

FASE	NOMBRE	PORCENTAJE SEMICUANTITATIVO (%)
$Ca(OH)_2$	Portlandita	92.06
$CaCO_3$	Calcita	7.93

ANEXO B

INFRARROJO

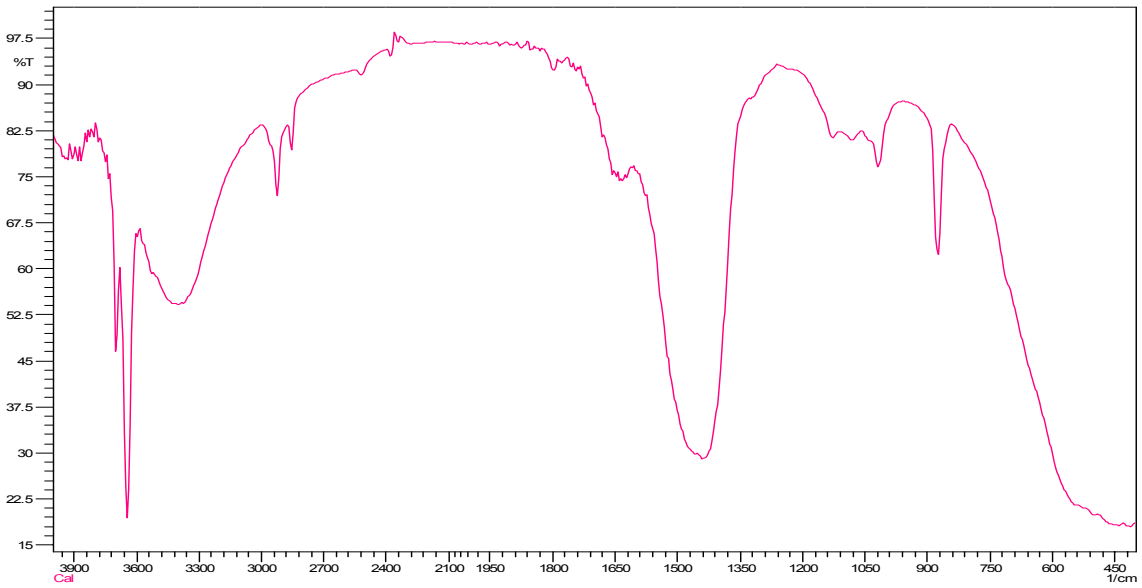


Figura B.1 Muestra de cal

1. Muestras molidas por 0, 10, 20 y 40 horas

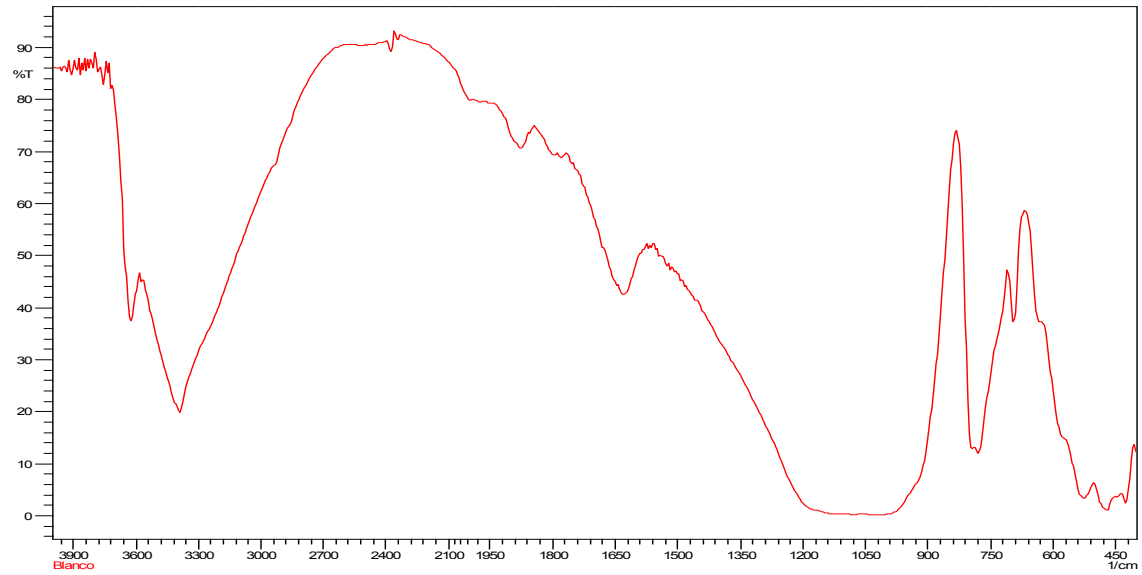


Figura B.2 Muestra sin molienda

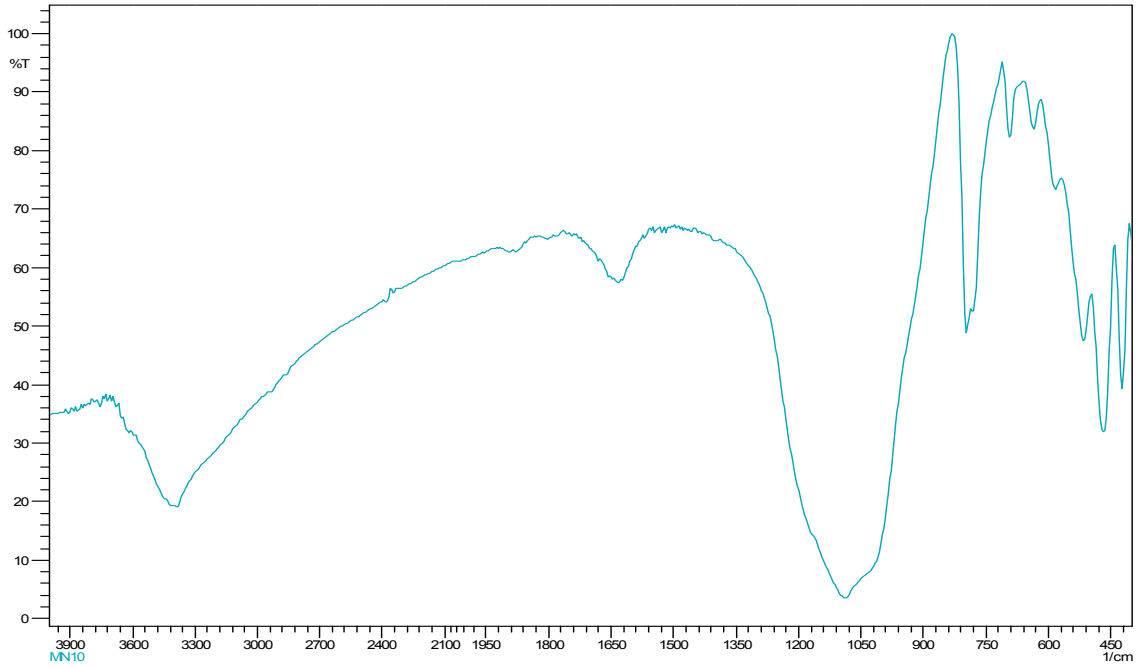


Figura B.3 Muestra molida por 10 horas sin adición de cal

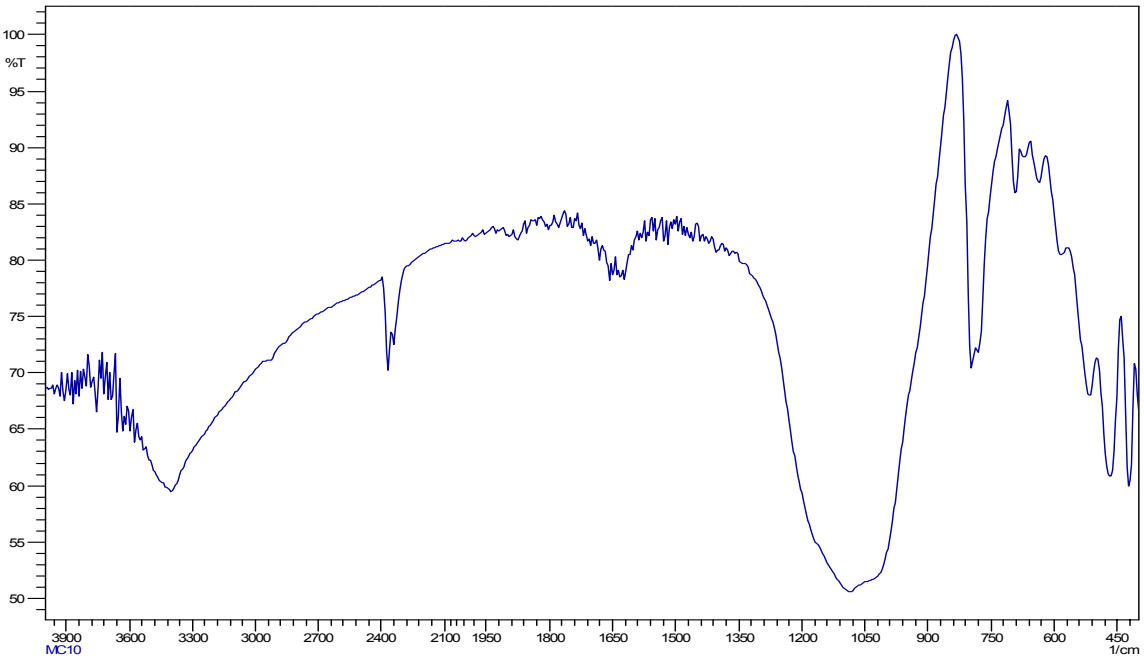


Figura B.4 Muestra molida por 10 horas con adición de cal

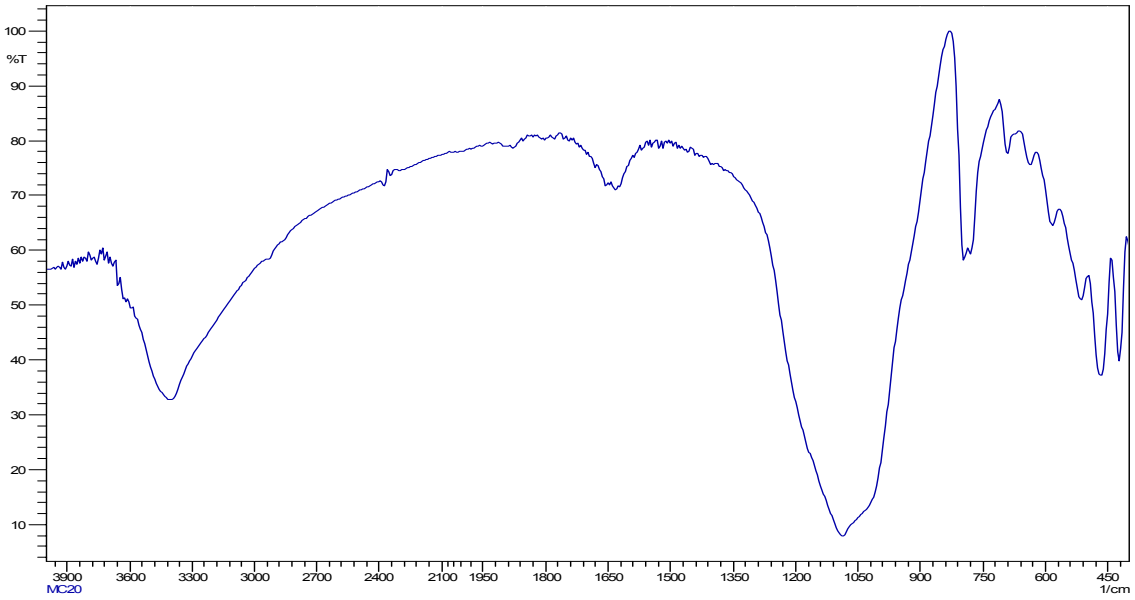


Figura B.5 Muestra molida por 20 horas con adición de cal

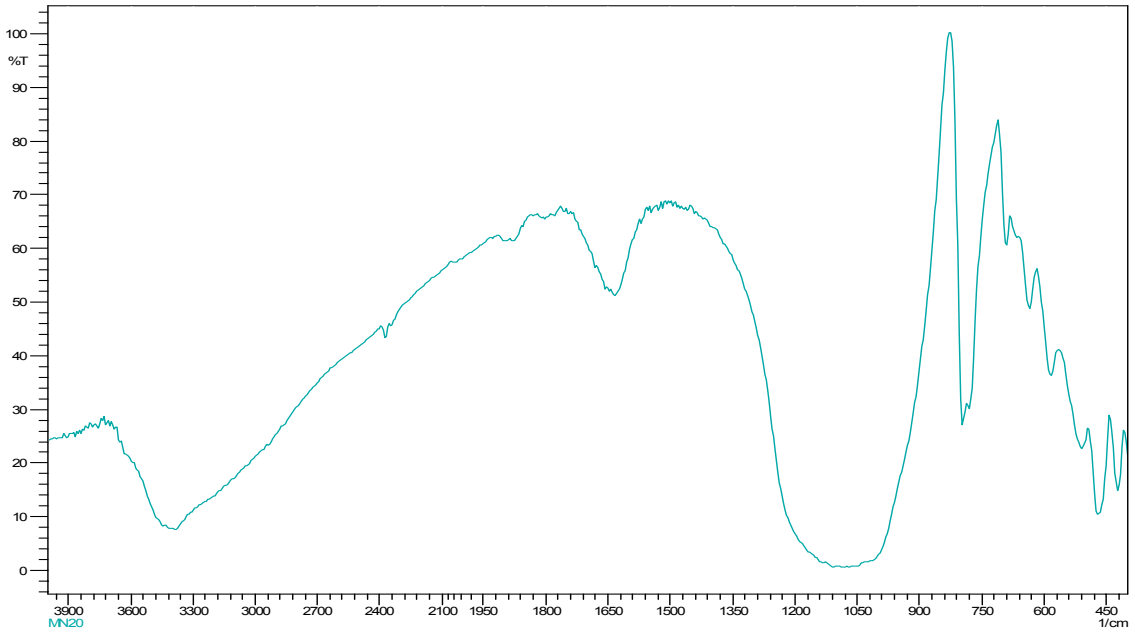


Figura B.6 Muestra molida por 20 horas sin adición de cal

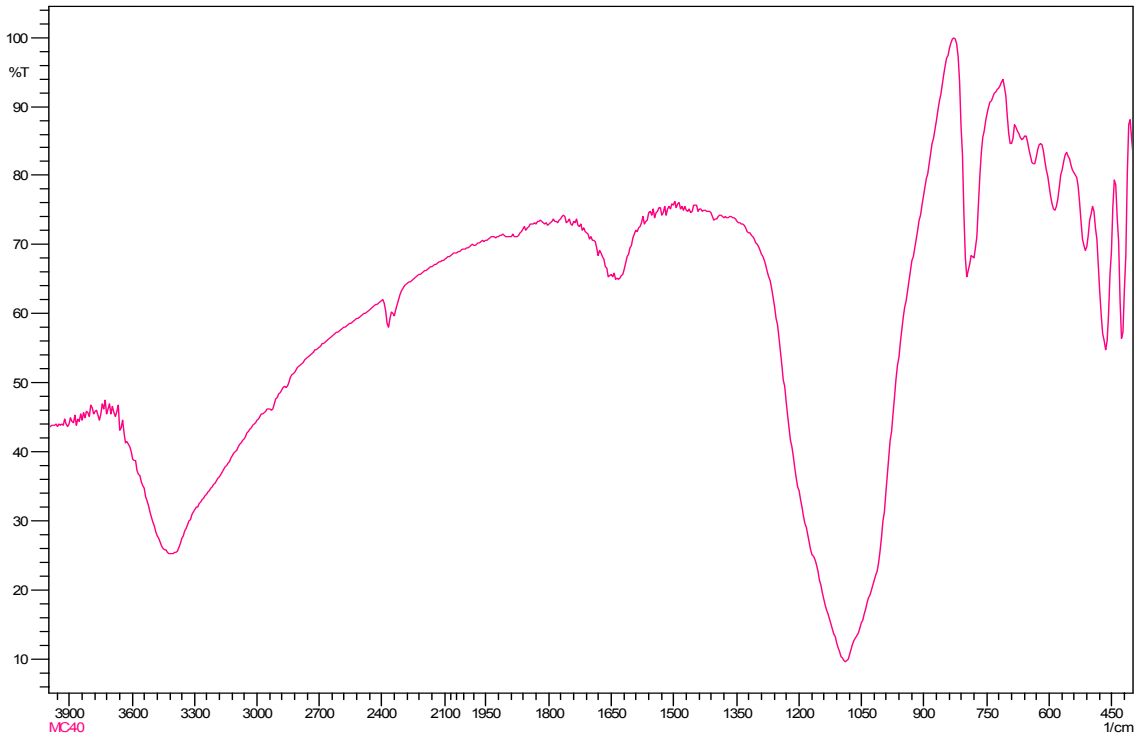


Figura B.7 Muestra molida por 40 horas con adición de cal

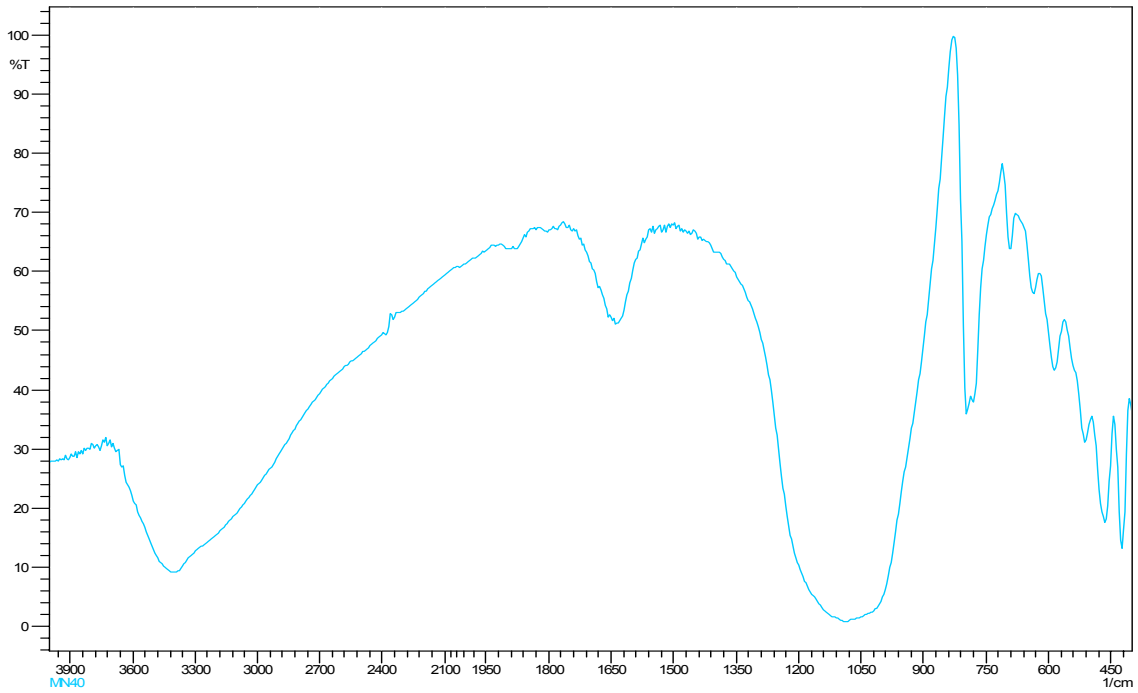


Figura B.8 Muestra molida por 40 horas sin adición de cal

ANEXO C

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y FOTOSEDIMENTACION

Tabla C.1 Análisis granulométrico, 1000 g de mineral

Número malla	Dp (µ)	Masa (g)	Masa (%)	Acumulado retenido (%). Acum(+)	Acumulado pasante (%). Pass(-)
18	1000µ	8.5	0.85	0.85	99.15
20	840µ	45	4.5	5.35	94.65
30	589µ	154.1	15.41	20.76	79.24
35	500µ	94.4	9.44	30.2	69.8
40	420µ	112.1	11.21	41.41	58.59
50	297µ	212.3	21.23	62.64	37.36
120	125µ	288.5	28.85	91.49	8.51
170	88µ	66.5	6.65	98.14	1.86
200	75µ	5.5	0.55	98.69	1.31
270	53µ	2.2	0.22	98.91	1.09
-270		10.9	1.09	100	0
		1000	**100**		

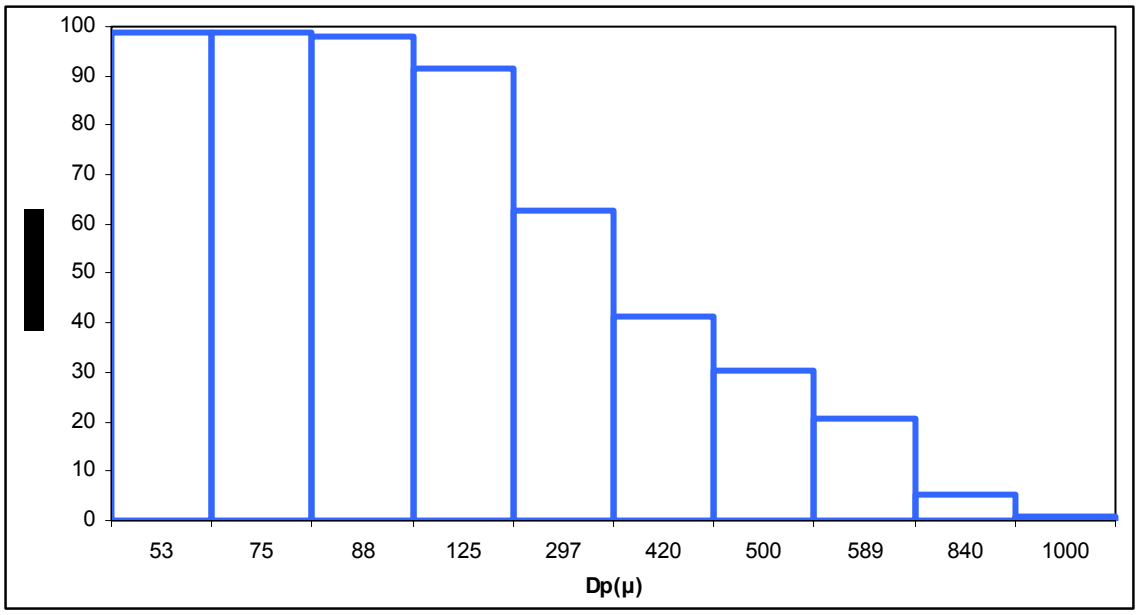


Figura C.1 Distribución granulométrica de la muestra sin molienda

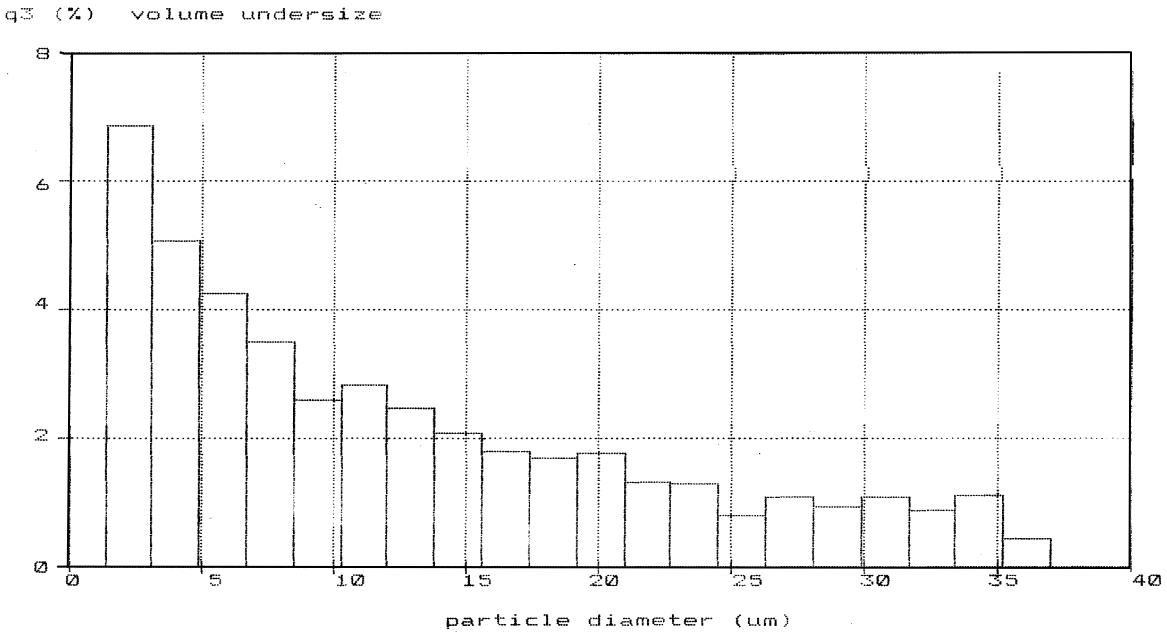


Figura C.2 Distribución granulométrica de la muestra con 10 horas de molienda sin adición de cal

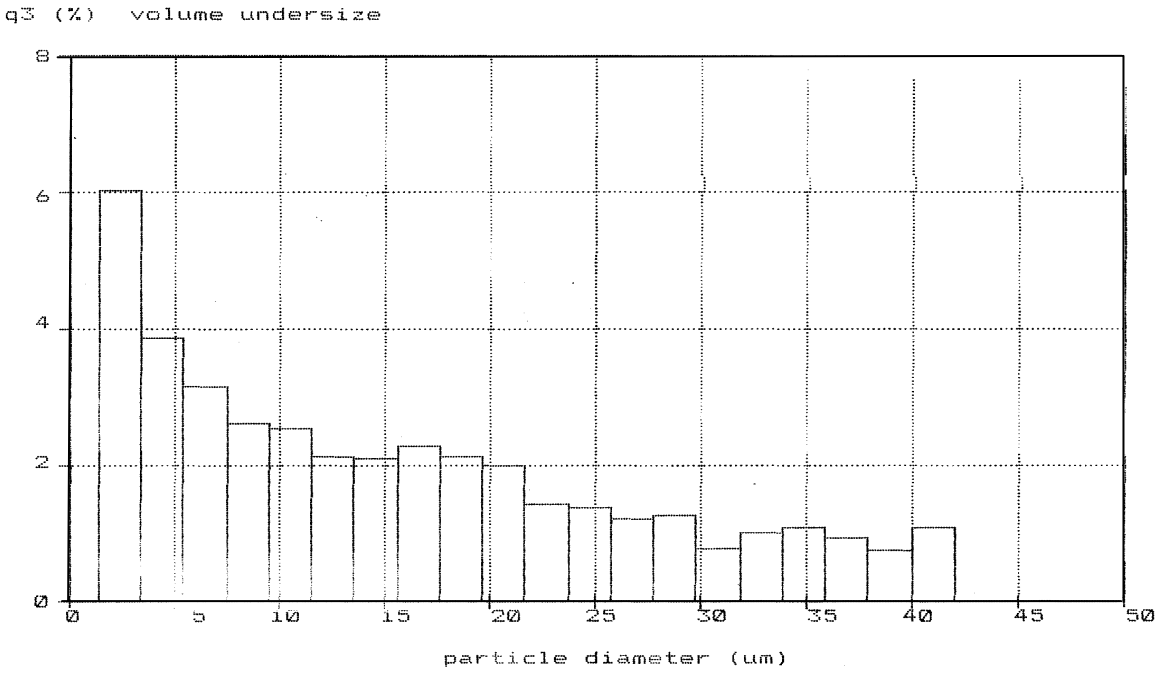


Figura C.3 Distribución granulométrica de la muestra con 10 horas de molienda con adición de cal

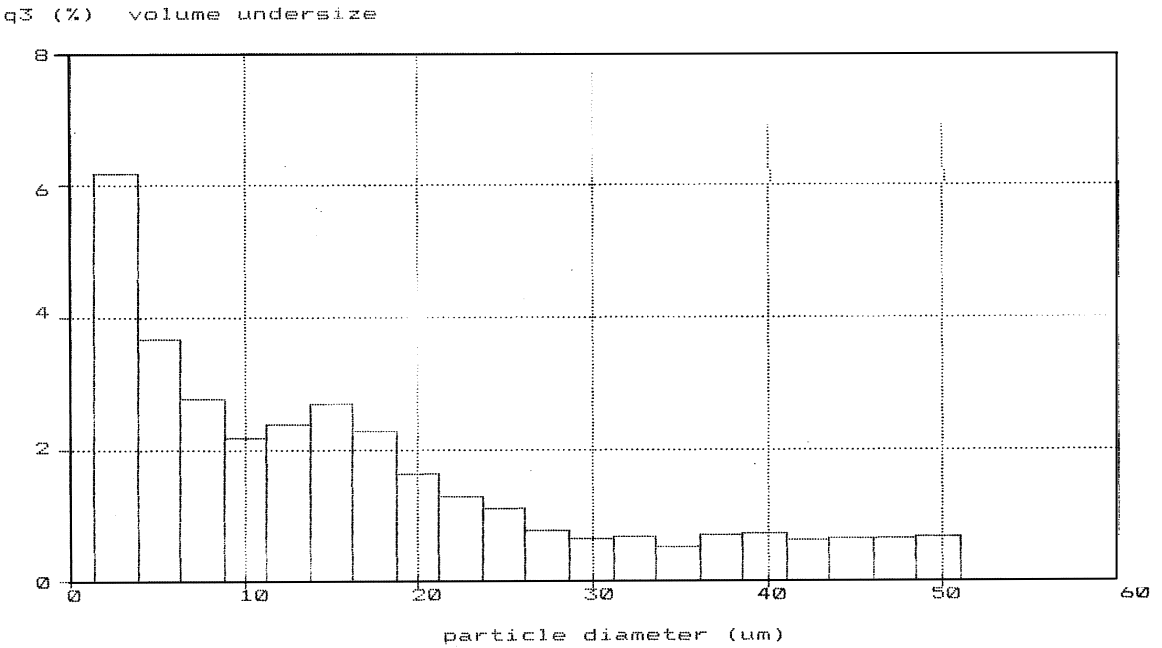


Figura C.4 Distribución granulométrica de la muestra con 20 horas de molienda sin adición de cal

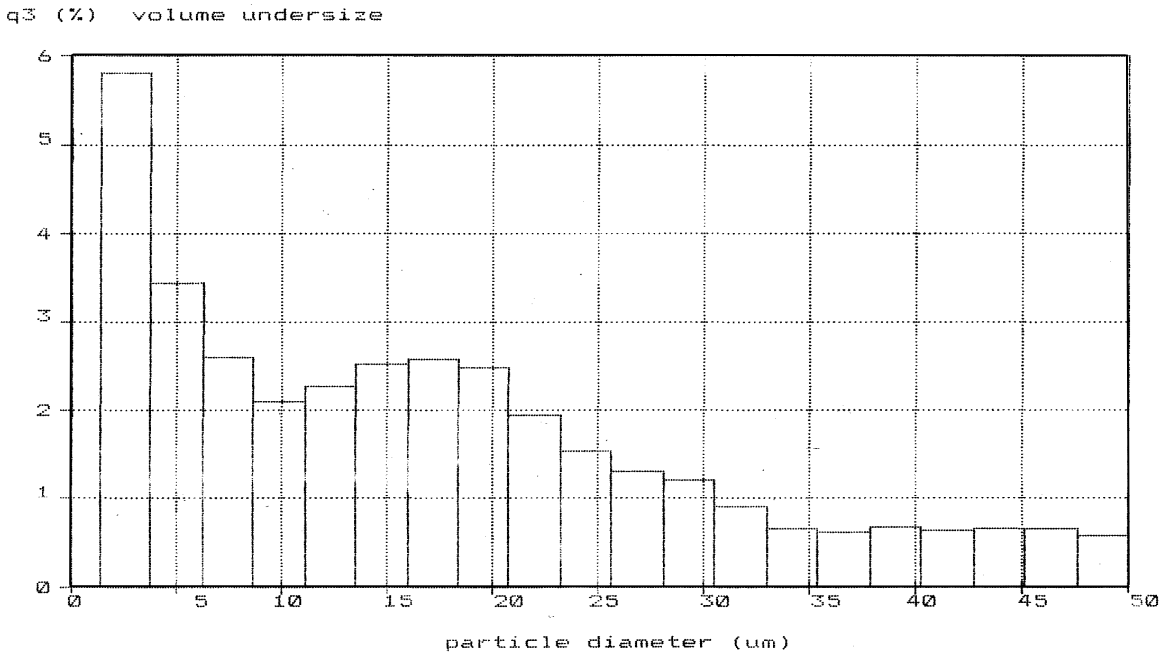


Figura C.5 Distribución granulométrica de la muestra con 20 horas de molienda con adición de cal

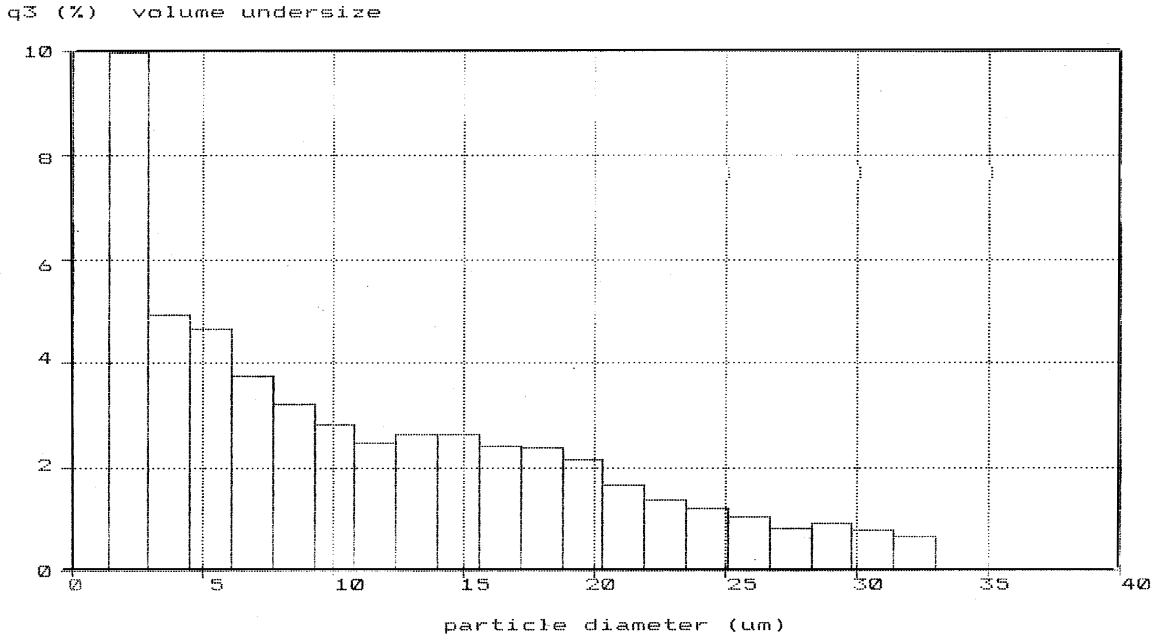


Figura C.6 Distribución granulométrica de la muestra con 40 horas de molienda sin adición de cal

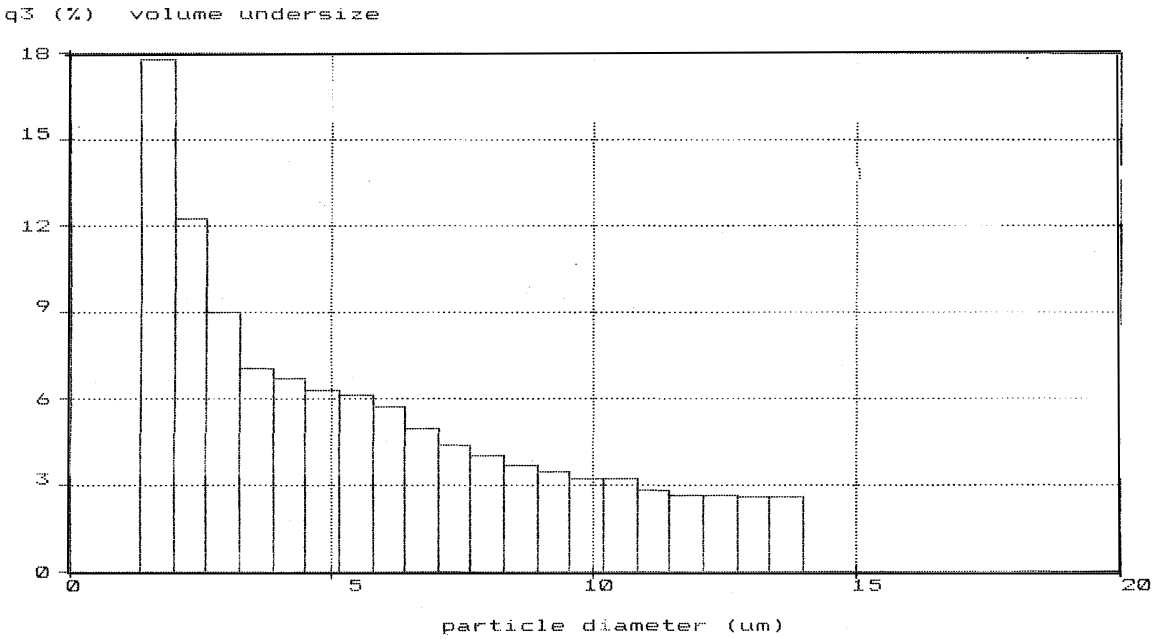


Figura C.7 Distribución granulométrica de la muestra con 40 horas de molienda con adición de cal

ANEXO D

Para la corrección de los datos de lixiviación, se utilizo la siguiente ecuación:

$$\left(W_{Au}\right)_{t+1} = \left[Au\right]_{t+1} * V_{t+1} + \sum_{j=1}^{t} \left(\left[Au\right] * V_{alicuota}\right)_j$$

- $\left(W_{Au}\right)$ = Peso de oro en la solución
- $\left[Au\right]$ = Concentración de oro en la solución
- V = Volumen de la solución