

EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ORO EN SOLUCIÓN APLICANDO EL  
PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN CON TRATAMIENTOS  
OXIDATIVOS Y CIANURACIÓN EN MOLIENDA A UN MINERAL REFRACTARIO

MILTON MAURICIO MUÑOZ MORCILLO  
LEONARDO ALVARADO ORDOÑEZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE QUIMICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2008

EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ORO EN SOLUCIÓN APLICANDO EL  
PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN CON TRATAMIENTOS  
OXIDATIVOS Y CIANURACIÓN EN MOLIENDA A UN MINERAL REFRACTARIO

MILTON MAURICIO MUÑOZ MORCILLO  
LEONARDO ALVARADO ORDOÑEZ

Trabajo de grado presentado como  
Requisito parcial para optar por el título de Químico

Director:  
FREDDY PANTOJA TIMARAN., Ph.D.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE QUIMICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2008

Las ideas y conclusiones aportadas en el presente trabajo de grado son de responsabilidad exclusiva de los autores.

Artículo 1° del acuerdo No. 324 del 11 de octubre de 1996, emanado del Honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

Director

---

Jurado

---

Jurado

San Juan de Pasto, Junio de 2008

## DEDICATORIA

A Dios por permitir culminar una más de las metas que me he propuesto.

A mi Madre Fanny Ordoñez y mi padre Oscar Alvarado por su apoyo incondicional, consejos, sacrificio y la confianza que depositaron en mí para alcanzar mis propósitos.

A mis hermanas, Martha Patricia y Karol Alexandra por estar siempre junto a mí.

A mi tío, Omar Alvarado por sus consejos y amistad incondicional.

A toda mi familia, amigos y compañeros que siempre me apoyaron en los momentos difíciles... Gracias.

Leonardo Alvarado Ordoñez.

## DEDICATORIA

Dedico este logro alcanzado a Dios por haberme permitido lograrlo, por permitir que comparta todos los días con las personas que más quiero, mi familia.

A mi madre Alicia Morcillo y a mi padre José Daniel Muñoz por todo el amor hacia mí, por ayudarme incondicionalmente y transmitirme lo mejor de sí. Gracias por estar ahí

A mis hermanas y tíos que con su apoyo permiten que culmine esta etapa en mi carrera

A mi compañero Leonardo Alvarado gracias a su colaboración y apoyo, gracias por su amistad y por los momentos que hacen especial la vida

A mis compañeros y amigos por compartir su amistad haciendo que la universidad sea una experiencia inolvidable... Gracias

Milton Mauricio Muñoz Morcillo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos sinceros a nuestro director, Freddy Pantoja Timaran., p.H.D, por sus orientaciones en el desarrollo de la propuesta inicial y culminación de nuestro trabajo de grado, por la oportunidad de trabajar en instituciones reconocidas a nivel nacional e internacional como INGEOMINAS, Regional Cali y la Escuela Politécnica Nacional en Quito Ecuador, además por el reconocimiento hacia la comunidad minera de la región, mediante la educación ambiental y la orientación técnica de los procesos productivos, en el caso específico de la minería del oro, buscando generar un cambio y un compromiso colectivo orientado hacia el mejoramiento de la calidad de vida, responsabilidad ambiental y la construcción de un modelo sostenible.

Al Departamento de Metalurgia Extractiva DEMEX de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, por brindarnos la oportunidad de trabajar en sus laboratorios en la culminación de nuestra investigación, facilitándonos el uso de los materiales, equipos y reactivos de laboratorio.

Al los Ingenieros Ernesto de la Torre Chauvín, Alicia Guevara Caiquetán y Marcelo Lozada, por guiarnos acertadamente por el camino del conocimiento y responder con amabilidad a nuestras inquietudes y peticiones de ayuda.

A todo el personal del DEMEX, gracias a su amistad y colaboración brindada día a día, haciendo de nuestra permanencia en el laboratorio una experiencia inolvidable.

A CORPONARIÑO, Centro Minero Ambiental Sotomayor, por el apoyo financiero para la culminación de nuestra investigación.

Al Ingeniero Jorge Iván Londoño, INGEOMINAS Cali, por la orientación y colaboración en la formulación de la propuesta inicial del trabajo.

Al Distrito minero de la llanada y en especial al Señor Clemente Toro, por su colaboración y apoyo durante la toma de muestra y consecución de los minerales objeto de estudio.

Al profesor Henry Escobar, por sus aportes en la presentación del documento final de nuestro trabajo.

A todos los profesores, laboratoristas, a nuestros compañeros y amigos por su apoyo, solidaridad y consejos, los cuales permitieron seguir adelante en los momentos difíciles.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. OBJETIVOS	23
1.1 OBJETIVO GENERAL	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MINERALES AUROARGENTÍFEROS	24
2.1.1 Tipos de yacimientos	24
2.1.2 El oro y sus principales características	25
2.2 MINERALES REFRACTARIOS	25
2.2.1 Minerales asociados al oro	26
2.3 MÉTODOS DE ESTUDIO DE LOS MINERALES AUROARGENTÍFEROS	28
2.3.1 Caracterización mineralógica	28
2.3.2 Análisis granulométrico	29
2.3.3 Análisis químico para la determinación de oro	29
2.4 EXTRACCIÓN DE LOS RECURSOS AURÍFEROS	32
2.4.1 Extracción del oro de sus menas por concentración	32
2.4.2 Cianuración de minerales auroargentíferos	33
2.4.2.1 Métodos de cianuración	34



2.5.1 Efecto de diferentes parámetros en la cianuración	35
2.5.2 Interferencia de la mineralogía en el proceso de cianuración	36
2.5.3 Mecanismo electroquímico de la cianuración	39
2.5.4 Cinética de la reacción	39
2.5.5 Controles químicos del proceso de cianuración	40
<b>2.6 PRETRATAMIENTOS Y TRATAMIENTOS OXIDATIVOS PARA MINERALES AURÍFEROS REFRACTARIOS</b>	<b>41</b>
2.6.1 La tostación	41
2.6.1.1 Tostación de minerales asociados al oro	42
2.6.2 Oxidación química	45
2.6.2.1 Adición de peróxidos	45
<b>3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>48</b>
<b>4. PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>49</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDIO	49
4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	49
4.3 EXTRACCIÓN DEL MINERAL Y TOMA DE MUESTRA	50
4.3.1 Preparación del mineral, molienda y homogenización	51
4.4 CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS MINERALÓGICO	51
4.4.1 Análisis Granulométrico	51
4.4.2 Difracción de Rayos X	51
4.4.3 Análisis con microscopio Petrográfico a luz Reflejada	51
4.5 ESTUDIOS QUÍMICOS APLICADOS A LAS MUESTRAS	52
4.5.1 Determinación de pH	52

4.5.2	Análisis de oro por ensayo al fuego	52
4.5.3	Análisis de elementos a través de Absorción Atómica y UV Vis	53
4.6	PRUEBAS METALÚRGICAS REALIZADAS A LOS MINERALES	54
4.6.1	Ensayo de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley	54
4.6.2	Distribución de valores en una prueba de Flotación Bulk	54
4.6.3	Cianuración estándar por agitación	55
4.7	PRUEBAS DE CIANURACIÓN APLICANDO TRATAMIENTOS OXIDATIVOS Y CIANURACIÓN EN MOLIENDA	55
4.7.1	Cianuración estándar por agitación como blanco	56
4.7.2	Cianuración con cianuración en molienda	56
4.7.3	Cianuración con inyección de aire	56
4.7.4	Cianuración con Peróxido de sodio $\text{Na}_2\text{O}_2$	56
4.7.5	Cianuración con cianuración en molienda más aire	56
4.7.6	Cianuración con previa tostación del mineral	57
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
5.1	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA	61
5.1.1	Análisis granulométrico	61
5.1.1.1	Porcentajes de oro en fracción por análisis granulométrico	62
5.2	ANÁLISIS MINERALÓGICO	64
5.2.1	Difracción de Rayos X	64
5.2.2	Análisis con microscopio a luz reflejada	65
5.3	ESTUDIOS QUÍMICOS	68
5.3.1	Determinación de pH	68

5.3.2 Análisis de oro por ensayo al fuego	69
5.3.3 Análisis de elementos por Absorción Atómica y UV Vis	69
5.4 PRUEBAS METALÚRGICAS	71
5.4.1 Ensayo de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley	71
5.4.2 Distribución de valores en una prueba de flotación	72
5.4.3 Cianuración estándar por agitación	74
5.5 CIANURACIÓN POR AGITACIÓN APLICANDO TRATAMIENTOS OXIDATIVOS Y CIANURACIÓN EN MOLIENDA	76
5.5.1 Recuperación de oro en solución de lixiviación	77
5.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	81
5.6.1 Análisis de varianza no paramétrico para tratamientos	82
6. CONCLUSIONES	85
7. RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	92

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Naturaleza de la refractareidad en minerales auríferos	26
Tabla 2. Técnicas analíticas comúnmente utilizadas en la caracterización de menas	29
Tabla 3. Análisis de elementos por Espectrofotometría de Absorción Atómica	32
Tabla 4. Pruebas y metodologías desarrolladas en el análisis de minerales auríferos	50
Tabla 5. Carga fundente utilizada para análisis de cabeza	52
Tabla 6. Carga fundente: análisis de concentrados de flotación estándar	53
Tabla 7. Carga fundente: análisis de concentrados de flotación de afinamiento	53
Tabla 8. Resultados obtenidos para el análisis granulométrico	61
Tabla 9. Porcentajes de oro en fracción por análisis granulométrico y ensayo al fuego	62
Tabla 10. Porcentaje de especies mineralógicas presentes en los minerales de cabeza	65
Tabla 11. Análisis microscópico de la muestra en roca, mineral El Paraíso	65
Tabla 12. Análisis microscópico de la muestra en roca, mineral El Páramo	66
Tabla 13. Análisis microscópico de la muestra en roca, mineral El Canadá	67
Tabla 14. Análisis microscópico de las muestras en roca, mineral Playa Dorada	67
Tabla 15. Medidas de pH cada 30 minutos por agitación mecánica	68
Tabla 16. Resultados obtenidos por ensayo al fuego de minerales de cabeza	69
Tabla 17. Resultados de disgregación ácida para determinación de elementos en porcentaje peso a peso	70
Tabla 18. Resultados de sales solubles analizadas por Absorción Atómica, en lixiviaciones ácida y acuosa	70
Tabla 19. Absorbancia y concentración de azufre como sulfatos en ppm	71
Tabla 20. Resultados obtenidos en mesa de concentración	72
Tabla 21. Concentración por flotación estándar y balance metalúrgico, mineral Playa Dorada	72
Tabla 22. Flotación de afinamiento y balance metalúrgico, mineral Playa Dorada	73
Tabla 23. Determinación de los compuestos presentes en las fracciones de afinamiento	74
Tabla 24. Recuperación de oro en solución final aplicando cianuración estándar	75
Tabla 25. Datos promedio de la recuperación de oro en solución final y relave, aplicando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda	76
Tabla 26. Datos promedio de porcentaje de oro en solución de lixiviación para la cianuración estándar y tratamientos aplicados	77
Tabla 27. Datos del porcentaje de recuperación de oro en solución final para cada tratamiento	81
Tabla 28. Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk, para los porcentajes de recuperación de oro en solución final	82
Tabla 29. Medias obtenidas para el porcentaje de recuperación de oro en solución final en cada tratamiento	83
Tabla 30. Análisis de varianza para los datos del porcentaje de recuperación de oro en solución final	83

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Grano de oro de 4 micras asociado a pirita	27
Figura 2. Reacciones de oxidación–reducción en el proceso de cianuración	39
Figura 3. Flujograma: caracterización y análisis mineralógico	58
Figura 4. Flujograma: estudios químicos y pruebas metalúrgica	59
Figura 5. Flujograma: pruebas de cianuración aplicando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda	60
Figura 6. Grafico: Distribución granulométrica de oro en cada fracción, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada	63
Figura 7. Identificación de especies mineralógicas. Vista al microscopio de sección pulida (20X), mineral El Paraíso	66
Figura 8. Identificación de especies mineralógicas. Vista al microscopio de sección pulida (20X), mineral El Páramo	66
Figura 9. Identificación de especies mineralógicas. Vista al microscopio de sección pulida (20X), mineral El Canadá	67
Figura 10. Identificación de especies mineralógicas. Vista al microscopio de sección pulida (20X), mineral Playa Dorada	68
Figura 11. Gráfico: Recuperación de oro en solución final aplicando cianuración estándar	75
Figura 12. Gráfico: Cinéticas de cianuración con datos promedio de porcentaje de oro en solución para la cianuración estándar y tratamientos aplicados	78
Figura 13. Partículas de mineral cianurado durante 48 h, partículas de mineral cianurado A) con oxidación; B) sin oxidación	79
Figura 14. Microscopia electrónica SEM del relave de cianuración del producto tostado en dos etapas, mineral Playa Dorada, donde se observa hematita porosa	80
Figura 15. Grafico: Medias de tratamientos para el mineral Paya Dorada	84

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Análisis granulométrico, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada	92
Anexo B. Balance metalúrgico para análisis de oro en fracciones, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada	94
Anexo C. Difractograma de cabeza. Minerales, El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada	96
Anexo D. Curvas de calibración para análisis de sulfatos y oro, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada	100
Anexo E. Condiciones de operación, flotación estándar y de afinamiento, mineral Playa Dorada	102
Anexo F. Cianuraciones estándar por agitación, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada	103
Anexo G. Cianuración estándar por agitación, empleando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda, mineral Playa Dorada	111

## GLOSARIO

**ALUVIÓN:** Depósitos frescos de sedimento asentado en el fondo de un río, en áreas de inundación, en lagos o en la base de las laderas de una montaña.

**ARENAS AURÍFERAS:** Arenas formadas por erosión de yacimientos auríferos, transportadas por corrientes de agua, generalmente depositadas en los lechos y terrazas de los ríos, las cuales contienen partículas de oro libre.

**BENEFICIO:** Conjunto de procesos físicos, químicos y/o físico químicos que se realizan para extraer o concentrar las partes valiosas de un agregado de minerales.

**CANCHA Ó ESCOMBRERA:** Espacio en el cual se acumula, tanto en la mina como en la planta, minerales, concentrados, desmonte, etc., en espera de su destino final.

**CELDA:** Depósito en el que se efectúa procesos metalúrgicos para recuperar metales. Por ejemplo, celda de flotación en los procesos de concentración de metales y celdas electrolíticas en los procesos de refinación eléctrica.

**CONCENTRACIÓN:** Proceso metalúrgico mediante el cual se elimina la ganga o material estéril obteniéndose el concentrado del mineral respectivo.

**CONCENTRADO:** Mineral de alta ley, obtenido mediante diversos procesos físicos o químicos en plantas. Las plantas de flotación procesan el mineral extraído de la mina, mediante cribado, chancado, molienda, adición de reactivos, flotación selectiva, filtrado y secado.

**DORÉ:** Mezcla impura y sin refinar de oro y plata obtenido en el ensayo al fuego o en la fundición de concentrados, arenas o precipitados.

**ENCUARTACIÓN:** Adición de plata químicamente pura a los análisis de oro, porque las aleaciones de oro y plata son insolubles en ácido nítrico, cuando la proporción de oro y plata es inferior 1:3, puede hacerse adhiriendo plomo en la compela en el momento de ser llevada a la mufla.

**ESCORIA.** Masa vítrea que queda como residuo al fundir un concentrado metálico en el ensayo al fuego; partes indeseables que se eliminan durante el proceso de fundición.

**FLOTACIÓN:** Proceso por el cual se inducen partículas minerales por acción del aire para que se adhieran a burbujas y floten, mientras que otras son inducidas a hundirse obteniendo así la concentración y separación de los minerales de valor.

**FUNDICIÓN:** Proceso que consiste en la separación de los metales contenidos en los concentrados minerales mediante el uso del calor.

**GANGA:** Material inútil que envuelve y acompaña a los minerales, compuesto por sílice, alúmina, óxidos de calcio y otros materiales durante el proceso de fusión, constituyen la escoria, material estéril que se desecha.

**LEY:** Es el contenido de un elemento valioso en una unidad de peso de la roca; es decir es una medida cuantitativa de lo que existe aprovechable en la roca al momento de extraerlo.

**LIXIVIACIÓN:** En minería, proceso químico de extracción de minerales valiosos de las respectivas minas, también indica un proceso natural en el que el agua del suelo disuelve los minerales de las rocas, dejándola con algunos minerales en proporción menor que al comienzo.

**MENA.** Se denomina así a toda acumulación de mineral con contenido valioso recuperable por algún proceso metalúrgico.

**MINA.** Explotación, a base de pozos, perforaciones y galerías o a cielo abierto, de un yacimiento mineral.

**MINERAL.** Es una sustancia natural, homogénea, de origen inorgánico, de composición química definida (dentro de ciertos límites) que posee unas propiedades características definidas, y generalmente, tiene una estructura cristalina.

**MINERAL REFRACTARIO.** Mineral aurífero asociado a elementos o compuestos sulfurados que no permiten obtener valores rentables de recuperación de oro por el método usual de cianuración.

**MINERALOGÍA:** Ciencia que se ocupa de la descripción, estudio y análisis de los minerales, sus propiedades físicas y químicas, su forma, composición, origen y yacimientos.

**PLACER:** Depósito aluvional de arena y grava que contiene metales valiosos como oro, estaño y otros.

**PULPA.** Fluido que contiene sólidos finos en un líquido (generalmente agua) a un porcentaje requerido.

**RELAVE Ó "COLAS".** Material relativamente estéril que se obtiene durante el proceso de beneficio de los minerales.

**TENOR:** Es el contenido de oro por unidad de peso o volumen.

**VETAS:** Cuerpos de mineral en forma alargada, limitados por planos irregulares de rocas estériles denominadas "cajas". Generalmente una veta es muy parada o vertical.

## RESUMEN

La investigación desarrollada comprendió el estudio mineralógico y químico de cuatro minerales auríferos para identificar las características que influyen en el proceso de cianuración y junto con los ensayos metalúrgicos sugerir el método de extracción mas adecuado para cada mineral, teniendo en cuenta la recuperación de oro en solución final por cianuración estándar como un factor decisivo en la determinación de la refractareidad en los minerales estudiados; dicha prueba, permitió obtener una recuperación de oro en solución del 62,4% para el mineral "Playa Dorada", lo cual clasificó al mineral como refractario.

La cianuración empleando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda en la recuperación de oro en solución final aplicados al mineral refractario, permitieron establecer que los métodos más adecuados de recuperación para este mineral fueron la cianuración en agitación con previa tostación del mineral y cianuración en agitación con adición de peróxido en la etapa de preaireación, obteniendo porcentajes de recuperación de oro en solución final del 91,63% y 73,11% respectivamente, evidenciando la necesidad de contrarrestar los elementos que impiden la fácil recuperación del metal precioso.

## ABSTRACT

This research was carried out including the chemical and mineralogical study of four gold minerals in order to identify the features that have an influence in the cyanidation process along with metallurgical tests it suggests the most appropriate method of extraction for each mineral, taking into account the recovery of gold in final solution for standard cyanidation as a key factor when determining the refractory property on the studied minerals, such proof, allowed to obtain a recovery of gold in a solution of 62,4% for the "Playa Dorada" ore, which was ranked as a refractory ore.

The cyanidation using oxidative treatments and cyanidation in milling in the recovery in final solution applied to the refractory ore, allowed to establish that the most adequate recovery methods for this mineral were the cyanidation in agitation with a previous roasting of the mineral and cyanidation in agitation adding peroxide in the stage of preaeration, obtaining percentages of recovery of gold in final solution of 91,63% and 73,11 respectively, making evident the need to counteract the elements that prevent the easy recovery of precious metal.

## INTRODUCCIÓN

La investigación “Evaluación de la recuperación de oro en solución aplicando el proceso de cianuración por agitación con tratamientos oxidativos y cianuración en molienda a un mineral refractario”, surge de la necesidad de profundizar sobre el conocimiento de la cinética de cianuración aplicada a minerales refractarios. Igualmente, es motivada por la necesidad de mejorar el nivel de recuperación del metal precioso empleando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda, especialmente para las explotaciones de oro en pequeña escala.

Es importante resaltar que la técnica de cianuración es empleada a pequeña escala en diversas explotaciones situadas en la zona minera andina del departamento de Nariño, en los municipios de Cumbitara, Samaniego, Los Andes, Santacruz-Guachaves y Mallama. La recuperación del oro con cianuración es menor al 60% debido a la falta de estudios básicos sobre la mineralogía y la no aplicación de tratamientos químicos que optimicen el proceso. En general, estas minas se caracterizan por un incipiente nivel técnico de las operaciones mineras, bajas inversiones y escasa mecanización. Por otra parte, en ninguna de las explotaciones se emplean procesos alternativos como flotación y la técnica con carbón activado por agitación, empleados ampliamente en países vecinos como Perú, Bolivia, Chile y Ecuador; donde se alcanzan recuperaciones entre 81% y 94% en un tiempo de 24 horas de cianuración<sup>1,2</sup>.

Otro aspecto que debe destacarse es el hecho que una utilización incorrecta de la cianuración puede ocasionar altos riesgos y daños a la salud de las personas, además de deteriorar la calidad de aguas y suelos. Sin embargo, al contrario del mercurio que también es utilizado ampliamente en la minería del oro, el cianuro es biodegradable<sup>3</sup>, lo cual es una gran ventaja frente a la amalgamación. La cianuración complementada con métodos gravimétricos, en buena parte de las minas, puede remplazar a la amalgamación. Asimismo, las arenas residuales (relaves ó colas) existentes en las minas de oro de Nariño se podrían cianurar empleando tratamientos químicos con buenos resultados.

En el desarrollo de la presente investigación se utilizaron metodologías convencionales y modernas para estudios mineralógicos y metalúrgicos. La mayor parte de los estudios se realizaron en los laboratorios del Departamento de Metalurgia Extractiva-DEMEX de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, en Quito, considerado como uno de los mejores centros de investigación en este campo en Latinoamérica. Igualmente, previo a la

---

<sup>1</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E.; QUINTANA, V. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Pretratamientos oxidativos hidrometalúrgicos para minerales auríferos refractarios polisulfurados. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. p. 231.

<sup>2</sup> INGEOMINAS. Instituto de Investigaciones en Geociencias; Minería y Química: Inventario minero del Departamento de Nariño. Bogota: Ministerio de minas y Energía, 2004. p. 29-35.

<sup>3</sup> HRUSCHKA, F. Manejo Ambiental en la Pequeña Minería. Bolivia: Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, 1998. p. 42.

investigación, se recibió una inducción sobre los aspectos más importantes del método de cianuración en el Instituto Colombiano de Geología y Minería-INGEOMINAS en Cali, Colombia.

En la investigación, principalmente se estudiaron diferentes minerales provenientes del Distrito Minero de La Llanada, Nariño y de Machala en la Provincia del Oro, Ecuador, a los cuales, en la primera fase se realizó una caracterización mineralógica, y en la segunda fase, análisis de oro y pruebas metalúrgicas de concentración gravimétrica y flotación, cianuración estándar. Estos estudios permitieron determinar su grado de refractareidad y empleando así la cianuración con tratamientos oxidativos y cianuración en molienda caracterizar la cinética de cianuración a un mineral refractario. Como resultado principal se obtuvo datos relevantes sobre la recuperación y el mejor tratamiento que puede ser extrapolado a la minería del oro de la región con el fin de mejorar su recuperación.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la recuperación de oro en solución aplicando el proceso de cianuración con tratamientos oxidativos y cianuración en molienda en un mineral con características de refractareidad.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ♣ Realizar una caracterización mineralógica general de los minerales objeto de estudio y establecer las características que les confieren refractareidad.
- ♣ Aplicar pruebas a nivel de laboratorio de la técnica de cianuración en agitación empleando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda del mineral con características refractarias.
- ♣ Analizar la cinética de disolución de cianuración con dichos tratamientos empleando Espectrofotometría de Absorción Atómica para análisis de oro en solución.
- ♣ Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos por cianuración estándar por agitación, tratamientos oxidativos y cianuración en molienda para el mineral con características refractarias.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Cada recurso minero en el mundo, plantea una problemática distinta frente a los procesos extractivos, y a pesar de que en términos generales los tratamientos puedan estar definidos, los resultados confiables de recuperación de los metales preciosos sólo pueden establecerse luego de ensayos metalúrgicos. Un concepto más amplio del procesamiento de minerales abarca los métodos químicos de tratamiento y por lo tanto se extiende al campo de la metalurgia extractiva para llegar a la producción de metales comercialmente puros<sup>4</sup>.

Los metales y minerales de importancia comercial se hallan muy raras veces en estado natural en las formas y grados de pureza que su utilización práctica exige, pues casi sin excepción, forman mezclas físicas o químicas o ambas con otras sustancias carentes de valor. La suma total de los tratamientos a los que se someten los minerales para separar y desechar sus fracciones carentes de valor se conoce con el nombre de procesamiento de minerales<sup>5</sup>.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MINERALES AUROARGENTÍFEROS

El origen de las minas determina sus características químicas: combinaciones presentes (tipos de minerales), rocas asociadas, etc., así como sus características físicas: forma del yacimiento, tamaño y grado de interpenetración de los distintos minerales, etc. Las características químicas condicionan el fundamento de los procesos de extracción del metal y por ello son esenciales en metalurgia extractiva. Las características físicas afectan las técnicas de explotación minera así como los procesos de separación y concentración de minerales. Es importante tener en cuenta no solo las características químicas de los minerales del metal que se va a obtener sino también la de los minerales potencialmente asociados; ya que en buena parte, la concepción de los procesos de extracción viene determinado por ello<sup>6</sup>.

2.1.1 Tipos de yacimientos. En la naturaleza se encuentran diferentes tipos de yacimientos: yacimientos primarios (de tipo volcánico-sedimentario, de tipo preorogénicos y de tipo plutónico-volcánicos postorogénicos) y los yacimientos secundarios (tipo detrítico).

Los yacimientos detríticos son particularmente importantes. Al ser el oro un metal inalterable, se libera al ser destruidas las menas auríferas; como resiste el ataque de los

---

<sup>4</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Importancia de estudios mineralógicos. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. p. 8.

<sup>5</sup> VASQUEZ GARCIA, J. Procesamiento de minerales auríferos: El control analítico en el procesamiento de minerales. Bogota: Ministerio de Minas y Energía, 1994. p. 2.

<sup>6</sup> BALLESTER, A.; VERDEJA, L.; SANCHO, J. Metalurgia extractiva fundamentos: Vol I. Madrid: Síntesis, 2000. p. 42-44.

disolventes naturales, se concentra arrastrado por los arroyos y ríos en aluviones auríferos o placeres que suelen ser de bastante extensión y elevada riqueza<sup>7</sup>.

2.1.2 El oro y sus principales características. El oro se encuentra en la naturaleza en estado nativo o como una aleación con plata denominada electrum. Otras aleaciones con metales del grupo del platino, o con cobre, son bastante raras, aún así se describen en la bibliografía casi una veintena. En cantidades muy pequeñas, existen minerales del tipo telururo, como la calaverita,  $\text{AuTe}_2$ , la krennerita,  $(\text{Ag,Au})\text{Te}$ , y la sylvanita  $(\text{Au,Ag})\text{Te}_2$ ; también se han detectado algunos sulfuros, antimoniuros y seleniuros.

El oro está prácticamente presente en su forma nativa, formando granos o partículas diseminados en las vetas de cuarzo y de otras rocas<sup>8</sup>. Por otra parte, el oro se encuentra libre en placeres auríferos (oro grueso), mientras que en el resto de yacimientos es necesario efectuar procesos de reducción de tamaño para lograr liberar a las partículas del metal precioso y exponerlas a los tratamientos hidrometalúrgicos de recuperación. Es importante señalar que procesos de molienda fina pueden alcanzar un máximo de alrededor de 15 micras de tamaño, por lo tanto, partículas de oro inferiores a este tamaño no podrán ser liberadas.

En la práctica se denomina oro grueso a las partículas de oro que son susceptibles de liberación y extracción, y se denomina oro fino a las partículas de tamaño inferior a los 20 micrones, que requieren procesos especiales de tratamiento para la extracción del metal precioso<sup>9</sup>.

## 2.2 MINERALES REFRACTARIOS

El término refractario, se aplica a minerales auríferos que no permiten obtener valores rentables de recuperación de oro por el método usual de cianuración. En términos cuantitativos, un mineral aurífero se considera refractario cuando la recuperación de oro es menor al 80% empleando procesos de cianuración convencional, aún después de molienda ultra fina. Además puede considerarse también como refractario a un mineral que logrando recuperaciones de oro superiores al 80%, mediante cianuración, produce residuos (relaves) con contenidos elevados de oro ( $3\text{-}30\text{g/ton}$ )<sup>10</sup>. En la tabla 1, se presentan los problemas metalúrgicos de acuerdo a la naturaleza del mineral refractario.

---

<sup>7</sup> BALLESTER, A.; VERDEJA, L.; SANCHO, J. Op. Cit., p. 411.

<sup>8</sup> Ibid., p. 410.

<sup>9</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Minerales auríferos refractarios. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. p. 4.

<sup>10</sup> Ibid., p. 3.

Tabla 1. Naturaleza de la refractareidad en minerales auríferos

Mineral	Problema metalúrgico	Proceso
Pirrotina	Reducción de recuperación y elevados consumos de reactivos (cianuro)	Preaireación u oxidación química
Marcasita, pirita, Arsenopirita	Oro demasiado fino para ser liberado por molienda	Oxidación a presión Tostación Biooxidación
Material carbonáceo	Características de preg-robbing – Oro adsorbido en el carbón natural del mineral	CIL Cloración Tostación
Telururos	Oro como parte componente de un compuesto de telurio	Tostación
Oro ocluído	Oro fino en el interior de la roca encajante (silíceo o sulfuroso), o soluciones sólidas	Molienda muy fina Tostación

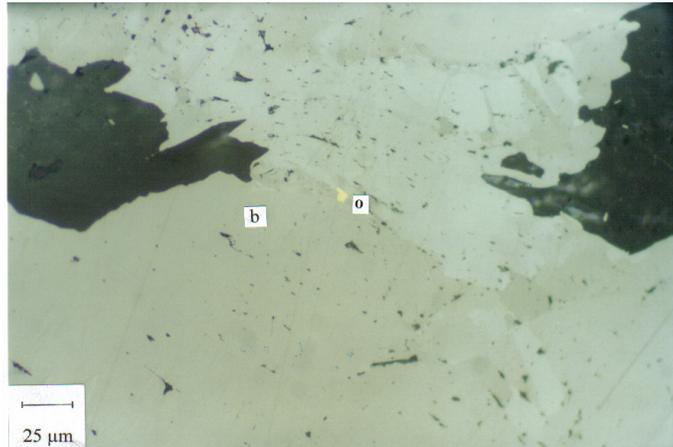
Refractory gold. E&MJ, Vol 194, No.6, June 1993. p. 21-22

2.2.1 Minerales asociados al oro. Desde el punto de vista de la metalurgia extractiva, las menas se pueden clasificar en función de las asociaciones del oro con otros elementos. El oro se asocia con mayor frecuencia con gangas cuarcíferas, asociadas a su vez a sulfuros como la pirita, la arsenopirita y la calcopirita; el oro se puede asociar adicionalmente a sulfosales, óxidos, silicatos carbonatos, sulfatos, carbón y minerales de uranio. Aquí reside la mayor o menor dificultad de su extracción<sup>11</sup>. Dicha clasificación es la siguiente.

♣ Asociación oro-pirita. La pirita ( $\text{FeS}_2$ ) es el más común de los sulfuros y es el mineral al que se asocia el oro con mayor frecuencia. Esta asociación puede ser en forma de oro nativo o electrum presente en un amplio rango de granulometría, que va desde granos fácilmente visibles hasta fracciones en micras.

<sup>11</sup> BALLESTER, A.; VERDEJA, L.; SANCHO, J. Op. cit., p. 412.

Figura 1. Grano de oro de 4 micras asociado a pirita



GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Op. cit., p. 5.

♣ Asociación oro-arsenopirita: La arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), es un mineral que se asocia al oro con frecuencia, probablemente es el segundo sulfuro después de la pirita. Las asociaciones encontradas son similares a las que suceden en el caso de la pirita, con un amplio rango de granulometría y de igual manera se han encontrado soluciones sólidas por reemplazamiento de oro en la estructura cristalina del arsénico, llegando incluso a concentraciones de 158 ppm de oro en solución sólida con la arsenopirita.

♣ Asociación oro-calcopirita: Esta asociación de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) se encuentra en depósitos porfíricos de cobre y depende principalmente de la textura de dicho depósito. El oro puede encontrarse asociado a minerales secundarios de cobre como bornita ( $\text{S}_4\text{CuFe}$ ), chalcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), novelita ( $\text{CuS}$ ), digenita ( $\text{Cu}_9\text{S}_5$ ), djurleita ( $\text{Cu}_{31}\text{S}_{16}$ ), azurita [ $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ ] y malaquita [ $\text{CO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ], especialmente en zonas de fractura.

Las asociaciones pirita-calcopirita-oro son más frecuentes, aquí el oro se ubica en los límites de granos de pirita o calcopirita o está totalmente encerrado en esta estructura en forma de finas partículas.

♣ Asociación de oro y otros sulfuros y sulfosales: El oro puede estar asociado a la pirrotina ( $\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$ ), galena ( $\text{SPb}_6$ ), esfalerita o blenda ( $\text{ZnS}$ ), sulfuros de níquel, arseniuros o sulfoarseniuros, antimonio y antimonio-arsénico-bismuto-plomo y sulfosales, con asociaciones semejantes a las que presenta en el caso de la asociación con la pirita.

♣ Asociación oro-óxidos de hierro: La asociación de oro con magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematina ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y óxidos secundarios de hierro como goetita [ $\text{Fe}^{+3}(\text{OH})$ ] y limonita [ $\text{FeO}(\text{OH})$ ], es relativamente común en ambientes oxidantes, la forma de asociación es variada, encontrándose incluso granos de oro recubiertos de finas capas de óxido secundarios de hierro.

♣ Asociación oro-silicatos y carbonatos: El cuarzo al igual que la pirita son minerales asociados con mayor frecuencia al oro. El metal precioso puede distribuirse en los límites de granos o encerrado en la ganga cuarcífera. Si además de la ganga silícica se encuentran óxidos o sulfuros en el mineral, el oro se encontrará ubicado preferencialmente cerca a estos grupos.

♣ En el caso de los filosilicatos muscovita  $[KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2]$ , biotita  $[K(Mg,Fe)_3(Al,Fe)Si_3O_{10}(OH,F)_2]$ , clorita  $[(Si_4O_{10})Mg_3(H_2O)Mg_3(OH)_6]$ ; el oro se puede ubicar entre las capas del mineral en forma de venas. Se ha encontrado adicionalmente oro asociado a baritina y también oro directamente asociado a arcillas, en tamaños similares al de las arcillas o prácticamente invisible.

♣ Asociación oro-material carbonaceo: El oro se ha encontrado finamente diseminado en el grafito y otros yacimientos minerales ricos en carbón.

♣ Asociación oro-arena y grava (placeres auríferos): El oro aparece en sedimentos de variable mineralogía y composición, puede estar junto a la ilmenita ( $FeTiO_3$ ), el rutilo ( $TiO_2$ ), casiterita ( $SnO_2$ ), óxidos de hierro, estaurólita  $[FeAl_4Si_2O_{10}(OH)_2]$ , minerales del grupo del platino, entre otros. Se puede presentar en forma de granos masivos e irregulares y ocasionalmente como “pepitas” de gran tamaño dispuestas a través de la arena<sup>12</sup>.

## 2.3 MÉTODOS DE ESTUDIO DE LOS MINERALES AUROARGENTÍFEROS

2.3.1 Caracterización mineralógica. Varios autores coinciden en que la caracterización mineralógica, es el conjunto de principios básicos por los cuales se pueden describir de manera cualitativa y cuantitativa las masas minerales desde los puntos de vista: mecánico, físico, químico y mineralógico. La información obtenida permite el diseño, operación y control de procesos industriales o de beneficio del mineral. Por lo tanto antes de realizar algún ensayo de beneficio debe hacerse un estudio mineralógico en el que se determinarán: el tipo de mena, la mineralogía cuantitativa del oro, su grado de liberación y el tamaño de partícula, la mineralogía de los sulfuros y óxidos del mineral, la cantidad de sulfuro y óxido refractarios, la mineralogía de alteración, los minerales formadores de recubrimientos, la mineralogía cuantitativa de carbonatos, los cianicidas en general y los consumidores de reactivos<sup>13</sup>. En la actualidad y por razones prácticas no existe una única técnica general que ofrezca toda esta información y por lo tanto debe utilizarse una combinación de varias de ellas. La tabla 2, resume las principales técnicas utilizadas de tipo no destructivo.

---

<sup>12</sup> CORNELIUS, K. Manual of Mineralogy. USA: John Willey & Sons, 1999. p. 250-255.

<sup>13</sup> BALLESTER, A.; VERDEJA, L.; SANCHO, J. Op. cit., p. 49.

Tabla 2. Técnicas analíticas comúnmente utilizadas en la caracterización de menas

Fluorescencia de rayos X (XRF)	Composición química global
Difracción de rayos X (XRD)	Composición mineralógica
Microscopía de luz reflejada	Composición mineralógica, tamaño de grano y textura
Microscopía electrónica de barrido (SEM)/Microanálisis por energía dispersiva de rayos X (EDS)	Composición química puntual, tamaño de grano y textura
Microsonda electrónica (EPMA)	Composición química puntual

BALLESTER, VERDEJA y SANCHO, Op. cit p. 50.

2.3.2 Análisis granulométrico. Este análisis se realiza con el fin de hacer una medición de tamaños de partículas. Existen dos técnicas especiales para caracterizar granulométricamente los minerales; análisis granulométrico por microscopía y análisis granulométrico por mallas o tamices; en la segunda se dan dos modalidades; por vía seca o por vía húmeda dependiendo de la granulometría y del tipo de masa mineral en consideración. El tamaño de una partícula por el método de malla, se define como el tamaño de una abertura para una malla cuadrada a través de la cual justamente pasa la partícula<sup>14</sup>.

2.3.3 Análisis químico para la determinación de oro. Existen varias técnicas analíticas cuyos límites de detección son suficientes para el trabajo que se realiza en metalurgia extractiva del oro, como son, el ensayo al fuego y el empleo de la disgregación ácida asociada con la Espectrofotometría de Absorción Atómica, los cuales han sido utilizados con gran éxito en controles analíticos de los procesos minero-metalúrgicos, en los campos de exploración, explotación y beneficio<sup>15</sup>.

**a.** Ensayo al fuego. El procedimiento más usado para el análisis de oro y plata, es el ensayo al fuego, el cual proporciona la precisión más elevada, aproximadamente el 99,98%; ya que combina una técnica muy eficiente de colección del metal (propiedad que tiene el plomo en estado de fusión de colectar el oro y la plata), con el método de evaluar gravimétricamente el oro y la plata: de la aleación plomo-oro-plata, el plomo es separado de los metales preciosos por una cuidadosa fusión oxidante, llamada copelación, en la cual el plomo es oxidado y absorbido por la copela en un 98,5%; el resto, se volatiliza dejando libre el botón de oro y plata. La plata se separa por disolución con HNO<sub>3</sub> diluido, quedando el oro para su cuantificación gravimétrica; cuando el botón de oro y plata no es atacado con el ácido nítrico donde la proporción de oro y plata es inferior 1:3, es necesario encuartar adicionando plata metálica y cubriendo con plomo metálico para finalmente ser atacado por el ácido. La plata se calcula por diferencia tomando como base el peso de ambos y el peso

<sup>14</sup> GAVIRIA, C.; GARCIA, E.; SANCHEZ, Z. Procesamiento de minerales auroargentíferos: Fundamentos y generalidades. Medellín: Universidad Nacional, 1992. p. 218.

<sup>15</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Op. cit., p. 12.

de la muestra empleada para el ensayo. Dentro del ensayo al fuego se desarrollan dos etapas importantes como lo son la fusión y la copelación<sup>16</sup>.

En el ensayo al fuego, cada reactivo de la mezcla cumple una función específica como se puede observar en el resumen que se presenta a continuación.

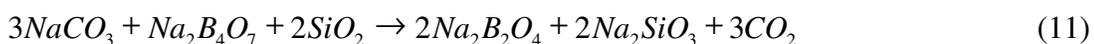
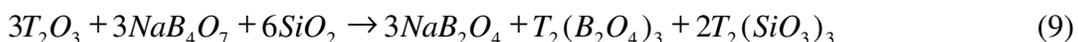
♣Tetraborato anhidro de sodio  $Na_2B_4O_7$  (Bórax). Es un reactivo fuerte debido a su carácter ácido que se funde a  $741^\circ C$ , se encarga de disolver todos los óxidos metálicos. La disolución de los óxidos metálicos se produce en dos etapas: el bórax fundido genera una especie vidriada transparente producto de la mezcla de metaborato de sodio y el anhídrido bórico (1) el que reacciona con el óxido metálico (ej. óxido de zinc) para formar el respectivo borato (2).



♣Óxido plumboso  $PbO$  (Litargirio). Es el reactivo más importante de la fundición que funde a  $883^\circ C$ , una parte se reduce a plomo metálico mediante un agente reductor (3). La función de este plomo es coleccionar el oro y la plata contenida en el mineral (4). El resto del litargirio actúa en parte oxidando las impurezas metálicas o pasa a formar la escoria al estado de silicato de plomo (5) o plumbatos con los óxidos metálicos (6).



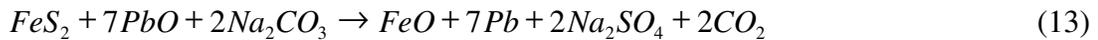
♣Óxido de silicio  $SiO_2$  (Sílice). La sílice actúa principalmente como escorificador del hierro (7), reacciona conjuntamente con el borato de sodio y óxidos monovalentes, divalentes (8) y trivalentes (9); sulfatos de metales monovalentes o divalentes (10), además reacciona con el carbonato y el tetraborato, transformando el tetraborato en borato, formando silicato de sodio y desprendiendo dióxido de carbono (11). El silicio se encarga de proteger el crisol contra la acción corrosiva del bórax y litargirio.




---

<sup>16</sup> VASQUEZ GARCIA, J. Procesamiento de minerales auríferos: El control analítico en el procesamiento de minerales. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 1994. p. 14.

♣Carbonato de sodio  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Funde a  $850^\circ\text{C}$  y a  $950^\circ\text{C}$ , se disocia parcialmente expulsando dióxido de carbono y liberando algunos álcalis libres (12). Posee propiedades desulfurantes (13), además proporciona un flujo básico durante la fundición. Se combina con el óxido de silicio y el tetraborato de sodio para formar silicato de sodio y tetraborato de sodio desprendiendo dióxido de carbono (11).



♣Nitrato de potasio  $\text{KNO}_3$ . Es un poderoso agente oxidante, funde a  $339^\circ\text{C}$  y se descompone alrededor de los  $400^\circ\text{C}$  liberando oxígeno (14). En presencia de la sílice tiene un efecto oxidante reforzado (15).



El nitrato oxida a los sulfuros a sulfatos y arseniuros a arseniatos. Este es usado comúnmente para convertir sulfuros metálicos a óxidos (16).



♣Carbón. En el ensayo al fuego el carbón es empleado como agente reductor que se encarga de reducir el óxido de plomo a plomo metálico con la producción de monóxido de carbono a alta temperatura (17) o dióxido de carbono a baja temperatura (18). Es considerado el más efectivo agente reductor para este fin<sup>17</sup>.



**b. Espectrofotometría de Absorción Atómica.** Esta técnica es utilizada para el análisis cuantitativo de aproximadamente 70 elementos. Se pueden analizar trazas de impurezas en aleaciones, analizar aguas, muestras de sólidos (solubilizados previamente), muestras de crudo, entre otras<sup>18</sup>. Según la tabla 3, en el campo de la metalurgia se analizan principalmente:

<sup>17</sup> LENAHAN, W.C.; MURRAY, R. Assay and analytical practice in the South African: Mining Industry. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001. p. 45-48.

<sup>18</sup> ESPI, J.A. El libro de la minería del oro en Iberoamérica. Madrid: Monterreina, S.A., 2001. p. 182-183.

Tabla 3. Análisis de elementos por Espectrofotometría de Absorción Atómica

Gas de combustión	Metales
Acetileno	Ag, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn
Oxido Nitroso	Al, Mo, i, Ba, Sn, Sb, V.
Hidruros	Hg, As, Se, Bi.

MARSDEN, J.; HOUSE, I. The chemistry of gold extraction: Series in metals and associated materials. Inland: Elles Horwood, 1992. p. 236.

En el caso de muestras sólidas, una vez que la muestra ha sido homogenizada, cuarteada y se ha tomado una cantidad representativa de la misma, se procede a solubilizar la muestra para el análisis por Absorción Atómica. Se utilizan principalmente tres métodos para disgregar la muestra, estos son:

- ♣ Disgregación acida en microondas.
- ♣ Disgregación acida en vasos de teflón.
- ♣ Fusión alcalina<sup>19</sup>.

## 2.4 EXTRACCIÓN DE LOS RECURSOS AURÍFEROS

Como se conoce, se han diferenciado cuatro grandes sistemas de extracción minera: subterránea (empleada sobre yacimientos de escasa dimensión y baja ley, además de los muy profundos), a cielo abierto (depósitos de elevado volumen y siempre con leyes bajas), dragado (sedimentos detríticos conteniendo oro muy liberado y en concentraciones muy bajas), y por último, minería artesanal (que incluye a los procedimientos anteriores pero aplicados con muy pocos medios y de manera muy selectiva).

2.4.1 Extracción del oro de sus menas por concentración. Debido a la considerable diferencia de peso específico entre el oro y la ganga que lo acompaña, el metal puede ser extraído de los placeres por procedimientos gravimétricos. En las menas en las que se encuentra como metal principal se puede recuperar por concentración gravimétrica, concentración por flotación, entre otros.

♣ Concentración gravimétrica. Se usa para la recuperación temprana de las partículas gruesas de oro liberadas en las operaciones de reducción de tamaño de minerales. La densidad de los minerales y el tamaño de las partículas son los dos factores más importantes en los procesos de concentración. La densidad es el factor principal debido a la gran diferencia existente entre la densidad del oro nativo ( $\rho = 19,3 \text{g/cm}^3$ ) y sus minerales de ganga<sup>20</sup>.

<sup>19</sup> MARSDEN, J.; HOUSE, I. The chemistry of gold extraction: Series in metals and associated materials. Inland: Elles Horwood, 1992. p. 86-90.

<sup>20</sup> CAZA REINOSO, J. Cianuración de las arenas-relave de la mina de Ponce Enríquez para la extracción de oro y plata. Quito, 1995, p. 3. Trabajo de grado. Escuela Politécnica Nacional.

♣ **Concentración por flotación.** De acuerdo a los autores<sup>21</sup>, la flotación es un proceso de concentración basado en las propiedades superficiales de los sólidos. La flotación se basa en la adherencia de partículas sólidas en suspensión a gases o a ciertos líquidos, preferentemente agua. La operación incluye todas las posibilidades de concentración de minerales en las que se obtiene la flotación en agua de partículas más pesadas que esta. Dentro de estas posibilidades, las espumas formadas consisten en la concentración de una especie mineral mezclada con otras al producirse una disminución en su densidad al interactuar con un gas (aire) en el seno de un líquido (agua). Las partículas de las especies se adhieren a las burbujas de aire concentrándose en la superficie del agua en forma de espuma. Este proceso es aplicable a minerales con baja ley y cuando se requiere de una molienda fina para obtener el grado de liberación adecuado.

Los mismos autores<sup>22</sup>, señalan que para que exista flotación se requiere que la superficie del mineral tenga un comportamiento hidrofóbico y, por tanto, una buena adherencia a las burbujas de aire; se utilizan unas sustancias denominadas colectores que facilitan el proceso. Una vez constituido el complejo partícula de mineral-burbuja de aire, se mantiene en el sistema una espuma estable para la separación de los distintos componentes del mineral, lo cual se consigue con los espumantes. Para incrementar las diferencias fisicoquímicas superficiales de las especies presentes y potenciar las propiedades de los colectores se emplean los denominados reguladores o acondicionadores que incluyen a los activadores, los depresores y los reguladores de pH del sistema, entre otros.

2.4.2 **Cianuración de minerales auroargentíferos.** Quiroz<sup>23</sup> y Escobar<sup>24</sup>, señalan que la cianuración es un proceso hidrometalúrgico de recuperación, que consiste en la disolución selectiva de los metales preciosos (oro y plata) en soluciones de cianuro alcalino de las arenas, concentrados o residuos provenientes de los procesos de molienda y concentración, para luego precipitarlo a su estado elemental mediante cementación o electrólisis. El procedimiento de la cianuración de los minerales de oro y plata reposa en el principio conocido hace ya muchos años, de que cianuros alcalinos en solución acuosa, disuelven los metales nobles. Estas soluciones de cianuro alcalino muy diluidas atacan de preferencia los metales valiosos y no se combinan con los elementos secundarios no valiosos. Esta peculiaridad es muy importante, ya que en un mineral aurífero las proporciones de material estéril a metal, es alta y se denomina acción selectiva.

La principal desventaja del proceso de cianuración es la alta toxicidad de las soluciones cianuradas por desprendimiento de ácido cianhídrico cuando se produce hidrólisis a pH menores a 9,5. Por otro lado, este proceso no es el adecuado para el tratamiento de minas refractarias auroargentíferas, ya sea por los altos consumos de cianuro o por la baja solubilidad de los metales preciosos en las soluciones cianuradas. Por lo cual, se deben

---

<sup>21</sup> BALLESTER, A.; VERDEJA, L.; SANCHO, J. Op. cit. p. 89.

<sup>22</sup> Ibid., p. 90.

<sup>23</sup> QUIROZ, G. Guía ambiental para el manejo del cianuro. Lima: Ministerio de Energía y Minas: Dirección General de Asuntos Ambientales, 1992. p. 75.

<sup>24</sup> ESCOBAR ALVAREZ, J.; ECHEVERRY VILLA, A. Op. cit., p. 102.

aplicar tratamientos efectivos como la oxidación química que descompone los minerales responsables de la refractareidad creando estructuras que hacen factible el contacto de la solución de cianuro y el metal precioso, mejorando las recuperaciones de oro y plata en solución<sup>25</sup>.

2.4.2.1 Métodos de cianuración. Los factores que controlan la escogencia del método de lixiviación son el tenor de la mena (Ley) y la facilidad con la cual los minerales valiosos se disuelven en un reactivo deseado. De acuerdo a estos factores, los métodos de lixiviación pueden clasificarse en lixiviación in situ, usada para minas de cobre de bajo tenor; lixiviación en canchas y botaderos, la cual se usa para la lixiviación de rocas que contienen minerales generalmente de tenor mayor que los botaderos y se han apilado en canchas de una manera predeterminada sobre una base preparada; lixiviación por percolación y lixiviación por agitación, estas dos ultimas las mas utilizadas<sup>26</sup>.

♣ Cianuración por percolación. Es una técnica en la que la solución lixivante se percola hacia arriba o hacia abajo a través del mineral que se ha triturado y se ha colocado en tanques. Los tanques están equipados con un falso fondo cubierto con un medio filtrante, el ciclo de lixiviación puede durar de 12 a 14 días y la extracción del metal puede ser tan alta como 80-85%. Este procedimiento es apropiado para minerales porosos y arenosos y es inaplicable a minerales que tienden a compactarse en masas impermeables; el método se usa para lixiviar menas de oro, plata, cobre, uranio y vanadio<sup>27</sup>. Este método es empleado en algunas minas de la zona minera de Nariño, principalmente en los municipios de Los Andes-Sotomayor, Santacruz, y Mallama; sin embargo, en algunos municipios de la zona, el consumo de cianuro ha disminuido notablemente, pues los tiempos entre cianuraciones por percolación es relativamente largo, en otras palabras se realiza procesos de percolación que duran aproximadamente un año y en el peor de los casos las plantas se han abandonado<sup>28</sup>.

♣ Cianuración por agitación. En general, este método es apropiado para los minerales de alto tenor, o bien concentrados o calcinados. Las densidades de la pulpa varían desde 40 a 70% de sólidos; el agente lixivante se agrega y la pulpa se agita continuamente. En la agitación el tiempo de contacto es de horas en lugar de días que se requiere en la percolación<sup>29</sup>.

---

<sup>25</sup> MEZA, L.A.; GAVIRIA, A. Procesamiento de minerales auroargentíferos; extracción y recuperación de metales preciosos. Medellín: Ministerio de Minas y Energía, 1981. p. 3.

<sup>26</sup> DOMIC, E. Lixiviación TL: Nuevo proceso hidrometalúrgico. Santiago de Chile: Boletín Minero, 1985. p. 30-39.

<sup>27</sup> MEZA, L. A. Op. cit., p. 11-12.

<sup>28</sup> CORPONARIÑO, Centro Minero Ambiental Sotomayor. Diagnóstico minero ambiental del distrito minero La Llanada, Departamento de Nariño: Proyecto aplicación de tecnologías apropiadas para disminuir la contaminación ocasionadas por mercurio y cianuro en los municipios de Sotomayor, Cumbitara, Mallama, Guachavez, La Llanada y Samaniego del Departamento de Nariño. San Juan de Pasto. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007. p.28-29.

<sup>29</sup> Ibid., p. 13.

## 2.5 QUÍMICA DE LA CIANURACIÓN

Según Meza<sup>30</sup>, existen diferentes teorías encaminadas a explicar el mecanismo de disolución de oro y plata en soluciones de cianuro, sin embargo, la evidencia termodinámica y cinética demuestra que el proceso de disolución el cual es de naturaleza electroquímica, sigue principalmente la siguiente reacción:



Esta conclusión se basó en los siguientes hechos:

- ♣ Por cada dos moles de metal, un mol de Oxígeno O<sub>2</sub> fue consumido.
- ♣ Por cada mol de metal disuelto, dos moles de cianuro fueron consumidos.
- ♣ El peróxido de hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se formó durante la disolución de oro y plata, y por cada dos moles de metal disuelto, un mol de peróxido fue producido.

2.5.1 Efecto de diferentes parámetros en la cianuración. Según Escobar y Echverry<sup>31,32</sup> existen diferentes parámetros que pueden afectar la velocidad del proceso de cianuración, entre ellos están los siguientes:

♣ Efecto de la concentración de cianuro. La velocidad de disolución de oro aumenta linealmente con el aumento de la concentración de cianuro hasta que es alcanzado un máximo, mas allá del cual un aumento adicional en el cianuro no aumenta la cantidad de oro disuelto, por el contrario, tiene un ligero efecto retardante.

♣ Efecto de la concentración de ión hidrógeno. Es esencial que la solución de cianuro se mantenga alcalina durante la lixiviación del oro por las siguientes razones:

Para prevenir la hidrólisis del ión cianuro:



Para prevenir la descomposición del cianuro por el CO<sub>2</sub> atmosférico:



Para neutralizar compuestos ácidos en las menas. Tales como sales ferrosas y sulfatos de magnesio en las aguas de las plantas antes de ser agregadas al circuito de cianuración,

---

<sup>30</sup> MEZA, L. A. Op. cit., p. 31.

<sup>31</sup> ESCOBAR ALVAREZ, J.; ECHEVERRY VILLA, A. Op. cit., p. 106

<sup>32</sup> MEZA, L.A. Op. cit., p. 35.

también para descomponer bicarbonatos en las aguas de las plantas antes de usarse en cianuración.

La alcalinidad debe ser cuidadosamente controlada para alcanzar buenas disoluciones de oro y plata para ayudar a la sedimentación de partículas, de tal manera que se pueda obtener una solución clara durante la separación de la mena cianurada. En la práctica, los rangos de pH generalmente van de 10,5 a 11,5.

♣ Efecto de la temperatura. Aumentando la temperatura, se espera que aumente la velocidad de disolución; por otra parte, el contenido de oxígeno de la solución disminuiría con el aumento de la temperatura. Entonces habrá una temperatura para la disolución máxima.

♣ Efecto de la velocidad de agitación. En procesos controlados químicamente la velocidad de agitación no tiene ningún efecto en la disolución, pero en procesos controlados difusionalmente aumenta la velocidad de disolución de oro y plata con el aumento de la velocidad de agitación. Esto se debe esencialmente a la disminución de la capa límite de fluido que rodea la partícula, ya que a menor espesor de la capa límite del líquido, menor distancia deben recorrer los iones cianuro y el oxígeno para alcanzar la superficie del metal precioso.

♣ Efecto de la concentración de oxígeno. A bajas concentraciones de cianuro, la disolución depende únicamente de la concentración de cianuro, mientras que a concentraciones altas de cianuro, la disolución es independiente de la concentración de cianuro y depende únicamente de la presión del oxígeno.

♣ Efecto de la granulometría. Según Meza y Gaviria<sup>33</sup>, al disminuir el tamaño de la partícula habrá mayor exposición de área superficial a la solución de cianuro. Por lo tanto, el grado de molienda apropiado para la máxima disolución es en el cual se libere la mayor cantidad de partículas de metales de oro y plata; sin embargo, debe estar regulado para que no se formen lodos ya que estos influyen negativamente en la cianuración.

2.5.2 Interferencia de la mineralogía en el proceso de cianuración. La mayoría del oro se encuentra frecuentemente como metal nativo, casi siempre aleado con varias cantidades de plata. Ciertos minerales están asociados mecánicamente con el oro; los más importantes son:

♣ Eléctrum rico en plata: Si el contenido de plata en el electrum supera el 30 por ciento, las partículas liberadas desarrollan, durante la cianuración, una capa secundaria de sulfuro de plata. Esta capa impermeable recubre las partículas de electrum y no permite su contacto con la solución cianurada convirtiéndolo en refractario.

---

<sup>33</sup> MEZA, L.A.; GAVIRIA, A. Op. cit., p. 8.

Además, se pueden formar capas de minerales secundarios como óxidos de hierro, chalcocita o covelita sobre oro nativo o sobre electrum que puede generar incluso problemas de excesivo consumo de cianuro en el proceso<sup>34</sup>.

♣ **Telururos:** Telururos de oro con o sin plata se disuelven lentamente en soluciones de cianuro. En general, la metalurgia de telururos individuales es poco conocida, pero lo más probable es que cada telururo tenga un comportamiento particular de disolución.

Los telururos insolubles que convierten a un mineral aurífero en refractario requieren un proceso de oxidación previo a la cianuración, para que se permita su contacto con la solución de cianuro.

♣ **Pirita:** Cuando el oro se encuentra asociado a la pirita y a otros sulfuros en partículas de tamaño inferior a las 10 micras se conoce como mineral aurífero refractario, debido a la dificultad de liberación que genera este tipo de situaciones. Sin embargo con una molienda ultrafina se logra obtener tamaños de partícula superiores a los 15 micrómetros, dando como resultado que el oro no se encuentra expuesto, debido a que esta estructura es difícil de romper por métodos químicos.

♣ **Arsenopirita:** La arsenopirita es un mineral estable y su comportamiento en la cianuración es similar al de la pirita en la metalurgia del oro<sup>35</sup>.

♣ **Calcopirita:** La extracción del oro fino de partículas de calcopirita es menos complicada que en el caso de la pirita; en general, el procesamiento de minerales que contienen principalmente calcopirita se concentran por flotación y el oro que se encuentra puede ser separado por fusión.

La presencia de minerales secundarios como covelita, chalcocita, azurita, malaquita, bornita, enargita entre otros, complican el proceso de cianuración, pues estos minerales se disuelven con facilidad y consumen cantidades excesivas de cianuro.

♣ **Pirrotina:** La pirrotina reacciona rápidamente con la solución cianurada y genera el consumo de cantidades importantes de cianuro y oxígeno. Un tratamiento efectivo en estos casos consiste en la preaireación de la solución alcalina del mineral, seguida de filtración anterior al proceso de cianuración, con este proceso el consumo de cianuro puede disminuir en un 50 %, pues se consigue separar los sulfuros solubles como sulfatos básicos, además se puede oxidar el hierro y precipitarlo como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  antes de la cianuración<sup>36</sup>.

♣ **Galena y otros minerales de plomo:** La galena puede ser estable dentro del proceso de cianuración, dependiendo de la alcalinidad de la solución. Los yacimientos que contienen óxidos de plomo pueden actuar de manera beneficiosa en ciertos casos, especialmente si la pulpa contiene iones libres de azufre, sin embargo, cantidades elevadas de compuestos

---

<sup>34</sup> GASPARRINI, C. Op. cit., p. 52.

<sup>35</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Op. cit., p. 8-9

<sup>36</sup> GASPARRINI, C. Op. cit., p. 54.

alcalinos de plomo pueden intervenir para formar cianuros insolubles. Para mejorar la recuperación del oro en este tipo de minerales y evitar la formación de plumbita se debe controlar la alcalinidad de la solución (pH = 10,5-11,0)<sup>37</sup>.

♣ **Antimonio y sulfosales de antimonio:** Estos minerales generan problemas similares a los descritos en el caso de la tostación de la arsenopirita, es decir antimoniatos refractarios se pueden desarrollar sobre partículas de oro, y esto no permitirá su contacto con las soluciones cianuradas. El tratamiento que se debe aplicar es el mismo que en el caso de la arsenopirita, se deberá tostar el mineral a temperatura y atmósfera controlada.

♣ **Esfalerita:** La esfalerita es normalmente estable en los procesos de cianuración, sin embargo, la mayoría de compuestos de zinc se disuelven en cianuro produciendo un consumo elevado de este reactivo. Además los complejos de cianuro y zinc interfieren en la determinación de cianuro libre ya que se forman complejos con la plata.

♣ **Óxidos de hierro y otros minerales de hierro:** Los óxidos de hierro como hematita y magnetita son prácticamente insolubles en soluciones alcalinas de cianuro, pero la goetita y la limonita si se disuelven provocando consumo elevado de cianuro en el proceso<sup>38</sup>.

♣ **Cuarzo, silicatos, carbonatos y sulfatos:** La mayoría de silicatos, carbonatos y sulfatos minerales son estables durante el proceso de cianuración, la distribución del oro en los límites de los granos o entre capas de filosilicatos facilita la disolución porque permite el contacto sin mayor problema de la solución de cianuración.

Cuando el oro se encuentra directamente asociado a arcillas se generan problemas debido a que las arcillas pueden formar una capa impermeable sobre la superficie de las partículas de oro después del proceso de molienda. La eliminación de arcillas previo al proceso de cianuración es una técnica efectiva para evitar este tipo de problemas, y eliminar además las dificultades de separación del sólido de la solución cianurada, esto siempre y cuando el oro no esté asociado directamente al material arcilloso.

Si el oro esta en partículas suficientemente finas puede formar coloides que hacen imposible su separación de las arcillas por métodos convencionales, convirtiendo al mineral en refractario. Estos efectos pueden ser reducidos por el uso de procesos carbón en pulpa CIP o carbón en lixiviación CIL.

♣ **Material carbonáceo:** La cianuración de minerales que contiene grafito o material carbonaceo esta acompañada generalmente de resultados erráticos en la evaluación del oro realmente recuperado por cianuración, pues el carbón provoca la temprana precipitación y adsorción de oro disuelto en la solución de cianuración. El proceso por el cual sucede esta precipitación no es del todo conocido, la eliminación del material carbonaceo es imprescindible en estos casos.

---

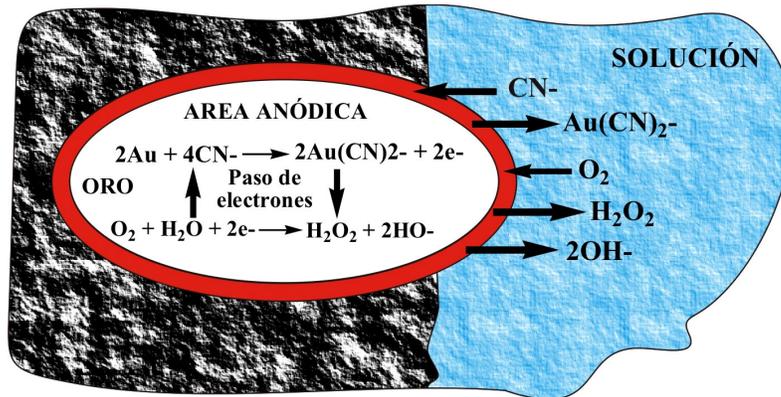
<sup>37</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Op. cit., p. 10.

<sup>38</sup> GASPARRINI, C. Op. cit., p. 56.

Tratamientos efectivos en este caso son la oxidación química empleando hipoclorito de sodio que descompone los minerales carbonáceos creando estructuras que hacen factible el contacto de la solución de cianuro y el metal precioso<sup>39</sup>.

2.5.3 Mecanismo electroquímico de la cianuración. De acuerdo a Misari<sup>40</sup>; la lixiviación puede llevarse a cabo mediante mecanismos diversos, tanto físicos como químicos y electroquímicos, en el caso específico de la cianuración se ha podido establecer que la disolución esta regida por los principios electroquímicos de la corrosión.

Figura 2. Reacciones de oxidación–reducción en el proceso de cianuración



GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Lixiviación con cianuro-cianuración Quito: Escuela Politécnica Nacional. p. 73.

La explicación esquemática de este fenómeno se facilita mediante la figura 2; la reducción del oxígeno sobre la superficie metálica en la zona catódica (22) va acompañada por la oxidación del oro en la zona anódica (23), de acuerdo a las siguientes reacciones:



La investigación demuestra que existen un flujo de electrones entre la fase líquida, en la que se encuentra el oxígeno disuelto y el cianuro y la fase sólida constituida por el oro (24). La capa limite de Nernst, situada entre ambas fases tiene un espesor variable según el método de lixiviación y la velocidad de agitación.

2.5.4 Cinética de la reacción. De acuerdo al mismo autor, una reacción fisicoquímica en la cual se hayan involucradas una fase sólida y otra líquida, sucede en las siguientes etapas:

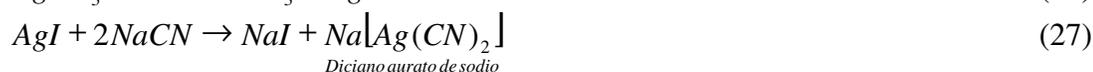
<sup>39</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Op. cit., p. 11-12.

<sup>40</sup> MISARI, F.S. Metalurgia del oro: Fundamentos básicos de la cianuración. Perú: Centro de Estudios y Promoción en Ciencias de la Tierra, 1993. p. 24-27.

- Difusión de los reactivos desde la solución hasta la interfase sólido- líquido.
- Adsorción de los reactivos en la superficie del sólido.
- Reacción en la superficie.
- Desorción de los productos de la reacción de la superficie del sólido.
- Difusión de estos productos de la interfase sólido-líquido a la solución<sup>41</sup>.

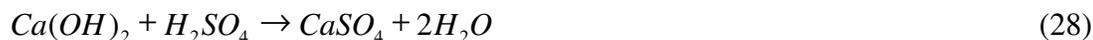
2.5.5 Controles químicos del proceso de cianuración. Metodologías empleadas en la Escuela Politécnica Nacional<sup>42</sup>, hacen referencia a los controles químicos durante el proceso de cianuración, estos son de gran importancia ya que de ellos depende la efectividad del proceso; se controla la cantidad de cianuro libre y el pH en solución.

♣ Control de cianuro libre. En la extracción de metales preciosos por vía hidrometalúrgica, se emplea el cianuro de sodio como el acomplejante para el oro y la plata. Una parte del cianuro de sodio debe entonces permanecer libre mientras la otra reacciona formando los complejos de oro y plata. La cantidad de cianuro de sodio que permanece en solución puede ser determinada a través de una técnica titulométrica empleando como indicador yoduro de potasio y como titulante una solución previamente estandarizada de nitrato de plata. Las reacciones de titulación son:



El punto final de la reacción se observa por aparición de un enturbiamiento blanquecino cuando se agrega una gota en exceso de nitrato de plata que reacciona sobre el complejo  $Ag(CN)_2Na$  dando  $AgNO_3$  soluble.

♣ Control de óxido de calcio libre. El óxido de calcio o cal se usa como medida protectora, pues al hidrolizarse la cal, el pH de la solución se eleva evitando que se presente la hidrólisis del cianuro de sodio, es decir evitando la formación del ácido cianhídrico el cual es altamente nocivo y en la mayoría de los casos mortal. La cantidad de cal libre debe controlarse para evitar consumos y gastos innecesarios. La cal libre se determina empleando fenolftaleína alcohólica al 1% como indicador y titulado con una solución estándar de ácido sulfúrico; el punto final de la titulación se aprecia cuando desaparece el color característico de la fenolftaleína. La reacción llevada a cabo durante la titulación es:



La alcalinidad protectora también sirve para defender la solución de la acción nociva del ácido carbónico. Este ácido tiene la tendencia de apoderarse del álcali soluble de cianuro y

<sup>41</sup> Ibid., p. 28.

<sup>42</sup> DE LA TORRE, E. Folleto de metalurgia extractiva. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2002. p. 105-117

transformarlo en carbonato, desalojando el ácido cianhídrico que se escapa al aire. La ligera capa que aparece en la superficie de las soluciones de cianuro, esta constituida por carbonato de calcio: el ácido carbónico se fija sobre la cal, en defensa del cianuro, en vez de emplearse descomponiéndolo a éste<sup>43</sup>.

## 2.6 PRETRATAMIENTOS Y TRATAMIENTOS OXIDATIVOS PARA MINERALES AURÍFEROS REFRACTARIOS

Se pueden usar procesos oxidativos como pretratamientos para minerales con altos contenidos de sulfuros, material carbonáceo, telururos y concentrados, estos pretratamientos o tratamientos permiten incrementar la extracción de oro por la posterior aplicación de técnicas hidrometalúrgicas usuales como la cianuración. Como ya se conoce, estos métodos se aplican cuando la cianuración directa de un mineral no permite obtener valores rentables de recuperación de oro, por alguna de las siguientes causas o combinación de ellas:

- a. El oro está localizado en la ganga mineral o en material sulfurado, y no puede ser adecuadamente liberado ni por molienda fina.
- b. El oro está asociado a minerales que consumen cantidades inaceptables de cianuro como son pirrotina, arsenopirita, covelita, etc.
- c. El oro está asociado a material carbonáceo que absorbe el oro disuelto durante la cianuración<sup>44</sup>.

2.6.1 La tostación. Es un pretratamiento ampliamente utilizado para el procesamiento de minerales auríferos refractarios, tiende a liberar el oro de los minerales portadores, eliminando elementos volátiles como azufre, arsénico, carbón, etc, produciendo generalmente un producto de alta porosidad, de modo que la solución cianurada pueda tener acceso al oro retenido. Dorr y Bosqui justificaron la tostación de menas refractarias como sigue<sup>45</sup>: “cuando el oro está asociado íntimamente con minerales piríticos y la molienda no ayuda a un incremento de la extracción de oro al nivel deseado, se hace esencial una tostación de la mena antes de la cianuración para liberar el oro de dichos minerales”.

En caso de que la extracción de oro de un mineral de una mena sin tostar fuera aceptable, el consumo de cianuro puede ser alto debido a la presencia de cianicidas en la mena sin tostar. Este consumo excesivo de cianuro se puede evitar tostando la mena antes de la cianuración, ya que muchos de los cianicidas son descompuestos e interfieren menos gracias a la

---

<sup>43</sup> ESCOBAR ALVAREZ, J.; ECHEVERRY VILLA, A. Op. cit., p. 120.

<sup>44</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Pretratamientos empleados para minerales auríferos. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. p. 21.

<sup>45</sup> DORR, J. V. N.; BOSQUI, F. L. Cyanidation and concentration of gold and silver ores. New York: McGraw-Hill. Book Co., 1980. p. 158.

tostación. Sin embargo, la mena tostada puede contener nuevos compuestos que son perjudiciales en el proceso de extracción y deben removerse<sup>46</sup>.

Según los mismos autores<sup>47</sup>, las menas que requieren una tostación, mas frecuentemente, son las que contienen arsenopirita, estibnita, pirrotina y pirita. Ya que dichos minerales se comportan de manera diferente durante la tostación, deben tratarse individualmente.

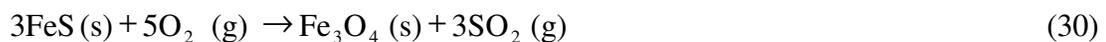
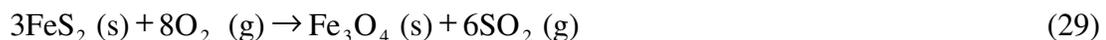
2.6.1.1 Tostación de minerales asociados al oro. La tostación de menas que contienen arsenopirita (FeAsS) y/o pirita (FeS<sub>2</sub>), minerales a menudo portadores de oro y refractarios a la cianuración es de gran interés práctico, y puede ser efectuada considerando:

- ♣ Máxima eliminación del arsénico y eliminación parcial del azufre previo a un tratamiento pirometalúrgico (fusión-conversión).

- ♣ Eliminación del arsénico y del azufre a fin de destruir ciertos compuestos y obtener un producto tostado con una alta porosidad de modo que se lo pueda tratar fácilmente por vía hidrometalúrgica (principalmente en el caso de arsenopiritas y piritas ricas en oro).

En función de estos objetivos las condiciones operatorias para la tostación pueden variar radicalmente, por lo cual el conocimiento de la influencia de la composición gaseosa de la atmósfera y temperatura de tostación sobre los rendimientos de eliminación del arsénico y azufre de la arsenopirita y pirita en función de la mena a tratar, es evidentemente un problema que amerita ser estudiado<sup>48</sup>.

- ♣ Tostación de sulfuros de hierro. La termodinámica de las reacciones involucradas en la tostación de minerales sulfurados, arsenicales y otros, pueden ser investigadas e interpretadas mediante los diagramas de estabilidad de Evans o de Kellog, donde se puede constatar que bajo condiciones oxidantes y/o con bajo contenido de SO<sub>2</sub> en la fase gaseosa, la pirita, marcasita, y pirrotina son directamente oxidadas a magnetita y luego a hematina:



Bajo condiciones reductoras o en atmósferas ricas en azufre o SO<sub>2</sub>, la pirita se descompone en pirrotina y azufre mediante un proceso de termodesulfuración.



---

<sup>46</sup> Ibid., p. 159.

<sup>47</sup> Ibid., p. 165.

<sup>48</sup> LITTEN, P.; HALSALL, J. Pyrometallurgy 87. London: The Inst.of Min. and Met, 1987. p..743-748.

En este caso, el azufre migra a la superficie de los granos del mineral donde se volatiliza dejando una pirrotina con estructura porosa. En presencia de oxígeno el azufre volatilizado rápidamente se oxida a  $SO_2$ .



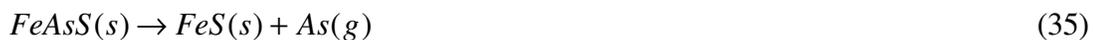
Si en una segunda etapa subsecuente, se emplea una tostación oxidante, la pirrotina porosa se oxida a magnetita y luego a hematita, según las reacciones (30) y (31). Consecuentemente, la tostación en dos etapas genera productos tostados con mayor superficie específica, que incrementa la accesibilidad de las soluciones lixiviantes y por ende la recuperación del oro de minerales auríferos refractarios, sin embargo estos resultados dependen de la mineralogía de la menas, y en el caso de la pirita la tostación en dos etapas no siempre es necesaria<sup>49</sup>.

♣ Tostación de sulfoarseniuros de hierro. Bajo condiciones oxidantes y/o con bajo contenido de  $SO_2$  en la fase gaseosa, a bajas temperaturas la arsenopirita forma magnetita, trióxido de arsénico y  $SO_2$ .



La magnetita formada se oxida posteriormente a hematina según la reacción (31), sin embargo, la formación directa de magnetita no es deseable, ya que impide la adecuada difusión del arsénico hacia la superficie del grano de mineral, lo que conlleva a la retención del arsénico en la matriz y se obtiene un material calcinado con baja porosidad y por tanto baja accesibilidad de las soluciones lixiviantes.

Bajo condiciones reductoras o en atmósferas ricas en azufre o  $SO_2$ , la arsenopirita se descompone en pirrotina y arsénico mediante un proceso de termodearsenización análogo al de la pirita.



En este caso, el arsénico se difunde a través de la red cristalina térmicamente expandida del mineral y llega a la superficie de los granos donde se volatiliza dejando una pirrotina con estructura porosa. En presencia de oxígeno el arsénico volatilizado rápidamente se oxida a trióxido de arsénico, según la reacción (36), pero en función de las condiciones operatorias del horno de tostación, el trióxido de arsénico puede oxidarse a pentóxido de arsénico sólido, según la reacción (37), bloqueando al arsénico en el material calcinado.



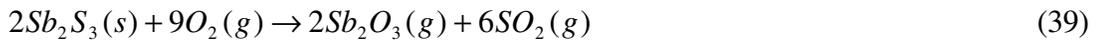

---

<sup>49</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: La tostación como pretratamiento de minerales auríferos refractarios. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. p. 41-42.

Esta reacción (37), es indeseable no solo por la retención del arsénico en la calcina, sino que el pentóxido de arsénico reacciona con la hematina formado arseniato férrico, sólido estable típicamente no poroso que tiende a ocluir al oro reduciendo su extracción por lixiviación. La formación de pentóxido de arsénico se minimiza operando los hornos en atmósferas pobres en oxígeno<sup>50</sup>.



♣ Tostación de minerales de antimonio. Los minerales de antimonio como la estibnita, durante la tostación oxidante reaccionan fácilmente con el oxígeno, formando trióxido de antimonio y dióxido de azufre.



El trióxido de antimonio, causa problemas de aglomeración de las partículas en lo hornos de tostación y tapa las toberas del los equipos asociados, incrementando sensiblemente los costos de mantenimiento. Además el antimonio forma aleaciones con los metales preciosos como por ejemplo el Ag-Sb (antimony glass), la misma que recubre la superficie del oro principalmente cuando está aleado con plata, impidiendo el acceso de la solución cianurada. Esta aleación se disuelve tratando el material calcinado con hidróxido de sodio<sup>51</sup>.

♣ Tostación de otros sulfuros. La asociación de oro con minerales sulfurados de cobre, cinc y plomo es menos común. Los sulfuros metálicos se oxidan a sus respectivos óxidos y a dióxido de azufre.



♣ Tostación de carbón y material carbonaceo. Las fuentes de carbón orgánico, tales como el ácido húmico, carbón grafitico y no grafitico, carbón mineral, son oxidados a dióxido de carbono durante la tostación.



En las condiciones de tostación de sulfuros, la velocidad de oxidación de varios materiales carbonáceos suele ser lenta, por lo que se pueden obtener oxidaciones incompletas. Sin embargo, en la mayoría de los materiales calcinados se reducen substancialmente los procesos de adsorción del oro disuelto. Durante la tostación los carbonatos se descomponen en sus óxidos metálicos y dióxido de carbono.




---

<sup>50</sup> Ibid., p. 43-48.

<sup>51</sup> Ibid., p. 48.



Si los carbonatos están presentes en un contenido mayor al 2%, el dióxido de carbono formado por calcinación, puede prevenir la oxidación del lecho de mineral y los óxidos formados captar el SO<sub>2</sub> en forma de sulfatos de calcio y magnesio.

2.6.2 Oxidación química. Los minerales oxidados de cobre incrementan exageradamente el consumo de cianuro; la pirrotina y otros minerales similares reaccionan con el oxígeno de la solución; el mercurio presente en relaves de amalgamación crea dificultades en los circuitos de adsorción y desorción. Para dar solución a estos problemas se utilizan como alternativas la adición de reactivos químicos; dentro de los tratamientos utilizados con mayor frecuencia tenemos la adición de peróxidos y sales de plomo.

2.6.2.1 Adición de peróxidos: La presencia de peróxidos en la solución de cianuración acelera significativamente la cinética de disolución de oro, sin incrementar el valor global de recuperación del metal precioso. El beneficio principal es en general la reducción del consumo de cianuro, que puede llegar incluso a la disminución de un 50 % del consumo de este reactivo<sup>52</sup>.

♣ Empleo de peróxido de hidrógeno en la cianuración (proceso PAL, Peroxide Assisted Leaching). Según Máchese<sup>53</sup>, el uso de oxígeno o un agente oxidante es esencial para la disolución de oro por cianuración. El peróxido es muy conocido en la industria minera como poderoso oxidante, capaz de atacar y destruir cianuro.



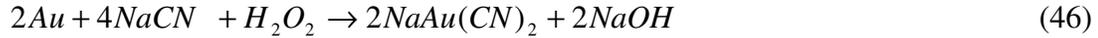
Sin embargo, es posible el uso controlado de peróxido como oxidante en la cianuración. La aplicación puede parecer como una contradicción. Una empresa Alemana ha desarrollado un proceso para aplicar peróxido en la cianuración, sin tener ningún efecto dañino sobre el cianuro. El interés de buscar un proveedor de oxígeno como el peróxido en lugar de aire, surge de una importante condición para la disolución de oro que es la presencia de oxígeno disuelto en la pulpa.

La cinética de extracción de oro depende de la concentración de oxígeno disuelto en la solución lixivante. Cuando se añade peróxido de hidrógeno, el proceso presenta cinéticas de extracción más rápidas que la lixiviación convencional, sin embargo en general la recuperación de oro no se incrementa en forma significativa. Una reacción de cianuración puede formularse asumiendo la formación de peróxido de hidrógeno como compuesto

<sup>52</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Pretratamientos oxidativos hidrometalúrgicos para minerales auríferos refractarios polisulfurados. Quito: escuela Politécnica Nacional, 2005. p. 33.

<sup>53</sup> MARCHESI, A. Minería: Optimización del proceso de cianuración con reactivos químicos. No 33 (ene.-mar. 2001). p. 25-26.

intermedio, que reacciona directamente como un oxidante, esto se resume en las siguientes reacciones.

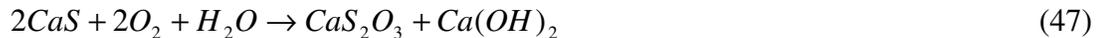


La primera reacción (45) usando oxígeno, es significativamente más lenta que la segunda reacción (46) con peróxido. Si la concentración de peróxido disponible se incrementa, la reacción de cianuración se ve favorecida.

El mismo autor<sup>54</sup>, hace referencia a que la intención del proceso PAL es proveer oxígeno en solución para evitar reacciones laterales, para ello debe cumplirse:

- a. El peróxido se diluirá antes de agregar a la pulpa.
- b. La dosificación de peróxido debe ser regulada en base al nivel de oxígeno en la pulpa.
- c. Una parte importante del control es un electrodo especial de oxígeno resistente a la abrasión de la pulpa.

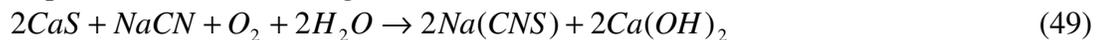
♣ Adición de sales de plomo: Los sulfuros solubles, formados por la descomposición de sulfuros minerales, consumen oxígeno y cianuro de la solución, para formar bisulfatos y/o tiocianatos, de acuerdo a las ecuaciones (47), (48):



El tiosulfato se oxida a sulfato:



Se puede dar también la siguiente reacción:



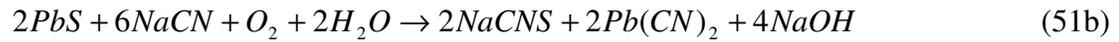
Si el medio está suficientemente oxigenado, se favorecerán las dos primeras reacciones (47) y (48). Si la cantidad de oxígeno disuelto es menor, se favorecerá la formación de tiocianato con el consecuente consumo de cianuro (49).

La adición de pequeñas cantidades de sales, como nitrato o acetato de plomo, aceleran la oxidación de sulfuros solubles, precipitándolos como sulfuro de plomo insoluble, que es oxidado a sales o hidróxido:




---

<sup>54</sup> Ibid., p. 29.



Estas especies luego se redisuelven en cal o cianuro y el ion plomo queda disponible para precipitar más sulfuros solubles. Es decir el plomo actúa como catalizador<sup>55</sup>:



---

<sup>55</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Op cit. p. 36.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de los procesos extractivos para la recuperación de oro, la cianuración es el proceso más utilizado a nivel mundial y no ha podido ser reemplazado por otros procedimientos, dada la efectividad y economía asociada a este proceso. Según John Marsden y Iain House<sup>56</sup>, señalan que aquellos minerales que contienen oro y no puede ser recuperado de manera satisfactoria por cianuración convencional (menor al 80%), se definen como minerales refractarios, debido a la presencia de sulfuros, telururos, sustancias carbonáceas activas y especies minerales asociadas al oro muy solubles en la solución cianurada, que requieren procesos nuevos o mejorados, como lixiviación a presión, tostación de sulfuros, cloración de minerales carbonáceos, pretratamientos químicos con agentes oxidantes o eliminación por flotación selectiva de los minerales cianicidas, para mejorar la recuperación.

Por otra parte, la cianuración en la región minera de Nariño no es una técnica que genere buenos resultados, ya que no es muy conocida y se realiza de una manera tradicional sin tener en cuenta la naturaleza mineralógica y química de cada mena, desconociendo así las características que dificultan la recuperación de oro, como también los tratamientos que se deben aplicar a dichos minerales para contrarrestarlas; obteniendo valores bajos en la recuperación y haciendo que esta técnica tenga un carácter antieconómico.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantea el siguiente interrogante.

¿En que porcentaje se mejora la recuperación de oro en solución en un mineral refractario, utilizando el proceso de cianuración con tratamientos oxidativos y cianuración en molienda?

---

<sup>56</sup> MARS DEN, J.; HOUSE, I. The chemistry of gold extraction: Series in metals and associated materials. England: Elles Horwood, 1992. p. 178.

## 4. PARTE EXPERIMENTAL

### 4.1 AREA DE ESTUDIO.

En la presente investigación, se realizó un estudio metalúrgico de tres minerales de la zona minera del municipio de La Llanada, Departamento de Nariño y un mineral de la zona minera de Machala, Provincia del Oro en Ecuador, donde la extracción y el procesamiento de minerales realizado en dichas zonas se convierten en un factor importante en la economía de cada región, llevándose a cabo mediante una minería a pequeña escala.

En el sector de La Llanada, perteneciente a la región minera de Nariño, se encuentran rocas metasedimentarias como: metalimolitas, pertenecientes al Grupo Dagua, cubiertas por depósitos coluviales cuaternarios y cenizas volcánicas poco consolidadas. Según la bibliografía, la mineralización encontrada corresponde a un proceso hidrotermal que originó vetas de relleno y reemplazo, compuestas de cuarzo y carbonatos enriquecidos con metales preciosos, especialmente oro nativo, asociado a sulfuros como arsenopirita, pirita, calcopirita, pirrotina, escalerita, galena entre otros minerales<sup>57</sup>.

A los minerales provenientes de La Llanada y Machala, se realizó caracterización mineralógica, pruebas metalúrgicas y de beneficio, con el fin de conocer y seleccionar el mineral con características refractarias, al cual se aplicó, cianuración con tostación previa, cianuración con tratamientos químicos oxidativos y cianuración en molienda, para evaluar la recuperación de oro en solución en dicho mineral.

### 4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.

Para la presente investigación, se trabajó con 4 muestras de mineral con características auríferas, a las cuales se realizaron análisis mineralógicos generales y pruebas de beneficio para la extracción y análisis de oro.

---

<sup>57</sup> CORPONARIÑO, Centro Minero Ambiental Sotomayor, Op. Cit., p.15.

Tabla 4. Pruebas y metodologías desarrolladas en el análisis de minerales auríferos

Pruebas	Metodología
Análisis granulométrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prueba de tamices</li> <li>• Distribución de oro en fracciones granulométricas</li> </ul>
Análisis mineralógico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microscopia óptica a luz reflejada</li> <li>• Difracción de Rayos X</li> </ul>
Análisis Químico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinación de pH</li> <li>• Ensayo al fuego</li> <li>• Análisis de elementos a través de Absorción Atómica</li> <li>• Análisis de azufre como sulfatos a través de Espectrofotometría UV-Vis</li> </ul>
Ensayos metalúrgicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración gravimétrica en mesa Wilfley</li> <li>• Distribución de valores en una celda de flotación Bulk</li> <li>• Cianuración por agitación</li> </ul>

Se realizó un diseño experimental teniendo en cuenta la recuperación de oro en solución como único factor, aplicando un ANOVA simple, contrastando la existencia de diferencias significativas entre medias cuando se llevan a cabo más de dos tratamientos<sup>58</sup>, aplicado a la cianuración para el beneficio del mineral con características de refractareidad. Los tratamientos evaluados fueron:

Tratamiento 1. Cianuración estándar por agitación.

Tratamiento 2. Cianuración con previa cianuración en molienda.

Tratamiento 3. Cianuración con inyección de aire.

Tratamiento 4. Cianuración con Peróxido de sodio Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Tratamiento 5. Cianuración con cianuración en molienda más aire.

Tratamiento 6. Cianuración con previa tostación del mineral.

#### 4.3 EXTRACCIÓN DEL MINERAL Y TOMA DE MUESTRA

La extracción del mineral se llevó a cabo mediante la metodología comúnmente conocida en la zona minera<sup>59</sup>, donde se realizó una perforación con martillos neumáticos que funcionan usando varillas de tungsteno de 0,80, 1,20 y 1,60m en diferentes puntos de la veta de las 4 minas. Luego se empleó explosivos de mecha lenta como Anfo para completar la perforación y liberar las rocas de la veta; finalmente las rocas seleccionadas aleatoriamente se redujeron de tamaño con maceta, tomando 45kg de muestra en cada una de las minas. Una vez extraídos los minerales, se acomodaron en sacos para ser transportados.

<sup>58</sup> MILLER, N.J.; MILLER, J.C. Estadística y Quimiometría para Química Analítica. Madrid: Pearson Education, 2002. p. 62-71.

<sup>59</sup> VASQUEZ GARCIA, J. Procesamiento de minerales auríferos: El control analítico en el procesamiento de minerales. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 1994. p. 3.

4.3.1 Preparación del mineral, molienda y homogenización. Se tomaron algunas rocas procedentes de cada una de las muestras para ser analizadas con microscopio petrográfico a luz reflejada.

**a. Molienda.** El mineral en bruto se pasó por la Chancadora secundaria para reducir de tamaño, posteriormente se paso por un molino de rodillos hasta alcanzar un diámetro máximo de partícula de malla 16 (1000 $\mu$ m). La muestra que quedo sobre la malla, se pasó nuevamente por el molino de rodillos hasta obtener toda la muestra menor a malla 16.

**b. Homogenización y Cuarteo.** Las cuatro muestras se homogenizaron y cuartearon por separado en una superficie plana sobre una lona, posteriormente se cuarteó empleando el cuarteador de Jones, reduciendo la muestra para que sea representativa.

#### 4.4 CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS MINERALÓGICO

4.4.1 Análisis Granulométrico. Con base en la metodología descrita por Wills<sup>60</sup> y teniendo en cuenta recomendaciones hechas por el Departamento de Metalurgia Extractiva-DEMEX de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, se tomó una muestra de 1Kg de mineral de cabeza, se molió por 30 minutos en un molino de bolas con 600mL de agua para obtener un porcentaje de sólidos del 62,5%, posteriormente se hizo un deslamado por malla 270 retirando todo lo que pasó por dicha malla y se recibió en un recipiente esmaltado para secar a 80-100 °C y finalmente pesar. El resto del material se traspasó a otra bandeja esmaltada, se seco y peso, se llevó al juego de tamices (80, 100, 150, 200, 270) por 20 minutos con agitación mecánica (Anexo A); finalmente se pesó cada fracción.

De cada fracción se tomaron 30g y se realizó ensayo al fuego para determinar la cantidad de oro presente en cada una de las fracciones de acuerdo a la metodología reportada por Lozada<sup>61</sup>. Para el balance metalúrgico (Anexo B) en las fracciones se siguió la metodología descrita por Álvarez<sup>62</sup>.

4.4.2 Difracción de Rayos X. Se pulverizaron 100g de muestra, en una pulverizadora Bleuler-Mill Naef, de 0,18Kw a 1000rpm; se compacto la muestra en los discos para análisis por difracción de rayos X en polvo, en un equipo D8 Advance Bruker axs, modelo BR-040T-03 para determinar la composición mineralógica del mineral (Anexo C).

4.4.3 Análisis con microscopio Petrográfico a luz Reflejada. Se tomaron pequeñas rocas de mineral, escogiendo la más adecuada, se pulió pasando por lijas número (80, 100, 150, 180) hasta obtener una superficie completamente uniforme; seguidamente, se pulió en una superficie plana de vidrio con ayuda de una suspensión de Silicon Carbbide Powper para

---

<sup>60</sup> WILLS, B.A. Tecnología de procesamiento de minerales: Tratamiento de menas y recuperación de minerales. México: Limusa, 1987. p 97-98.

<sup>61</sup> LOZADA, M. Beneficio de minerales auríferos: Ensayo al fuego. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1986. p. 9-11.

<sup>62</sup> ALVAREZ, R. Laboratorio de menas: Prácticas de mineralurgia. Madrid: Fundación Gomez-Pardo, 1989. p. 2-4.

lograr una mejor uniformidad; finalmente se llevó a la pulidora Poenix Beta Bueler 60-3002 donde se afinó con ayuda de una resina de suspensión de diamante en los discos de 6µ y 1µ por 5 minutos cada uno. Finalmente se obtuvieron las superficies completamente pulidas y se llevaron al microscopio petrográfico a Luz reflejada Leyca DMLP Pentax 10446175.

#### 4.5 ESTUDIOS QUÍMICOS APLICADOS A LAS MUESTRAS

Los análisis químicos se realizaron a través de ensayo al fuego y técnicas espectrofotométricas, tanto en Absorción Atómica de llama como en Ultravioleta Visible.

4.5.1 Determinación de pH. Se pulverizan 100g del mineral y se mezclaron con 200mL de agua para obtener un porcentaje de sólidos del 33,33%, se agitó por 30 minutos y se midió el pH. Posteriormente se tomo el pH cada 30 minutos hasta lograr su estabilización<sup>63</sup>.

4.5.2 Análisis de oro por ensayo al fuego. Por este método se analizó la cantidad de oro presente en la muestra de acuerdo a la metodología reportada por Lozada<sup>64</sup>. Para análisis de cabeza, la muestra se pulverizó y homogenizó, del pulverizado se pesaron 30g y se llevaron a tostación a una temperatura que ascendió desde cero hasta 800°C para eliminar la mayor parte de compuestos azufrados.

La tabla 5 muestra la carga fundente utilizada para el análisis de cabeza, la cual se homogenizo junto con la muestra, se llevó a un vaso de arcilla y luego a la mufla donde se dejó por 90 minutos, a partir de 850 hasta los 900°C; cuando la muestra estuvo totalmente fundida se vació a un lingotera cónica, una vez fría se retiró y martilló la parte inferior para obtener el régulo y limpiarlo de la escoria, formando un cubo. El régulo obtenido se llevó a una copela para que el plomo sea absorbido como PbO y así obtener el Doré, el cual se peso; posteriormente se le realizó un ataque con una solución de HNO<sub>3</sub> (1:1) conjuntamente con un calentamiento suave durante 60 minutos para disolver la plata y obtener el oro, el cual se calcinó a 800°C por 5 minutos; finalmente se dejo enfriar y se peso.

Tabla 5. Carga fundente utilizada para análisis de cabeza: minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada

Reactivo	Cantidad (g)
Sílice (SiO <sub>3</sub> )	0
Bórax(Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )	30
Carbonato de Sodio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	40
Litargirio (PbO)	40
Carbón (C)	2

<sup>63</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Importancia del análisis químico, mineralógico de minerales auríferos. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. p. 11.

<sup>64</sup> LOZADA, M. Beneficio de minerales auríferos: Ensayo al fuego, Op. Cit., p.9-11.

Tabla 6. Carga fundente: análisis de concentrados de flotación estándar: CA, CB y R, mineral Playa Dorada

Reactivo	Cantidad (g)		
	CA	CB	R
Sílice (SiO <sub>3</sub> )	10	10	0
Bórax(Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )	30	30	20
Carbonato de Sodio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	20	20	25
Litargirio (PbO)	50	50	40
Carbón (C)	3	3	3

Tabla 7. Carga fundente: análisis de concentrados de flotación de afinamiento: Cf , RA<sub>2</sub>, RA<sub>1</sub> y Rf, mineral Playa Dorada

Reactivo	Cantidad (g)			
	Cf	RA <sub>2</sub>	RA <sub>1</sub>	Rf
Sílice (SiO <sub>3</sub> )	15	15	0	0
Bórax(Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )	30	30	20	20
Carbonato de Sodio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	20	20	25	25
Litargirio (PbO)	50	50	40	40
Carbón (C)	3	3	3	3
Nitrato de potasio (KNO <sub>3</sub> )	5	5	0	0

4.5.3 Análisis de elementos a través de Absorción Atómica y UV Vis. Los análisis de disgregación ácida y pruebas de lixiviación, se realizaron de acuerdo a las metodologías propuestas por De la Torre y Guevara<sup>65</sup>.

♣ Disgregación ácida. Para la preparación de la muestra, se pesaron en un reactor de teflón 200mg de mineral pulverizado y homogenizado, se añadió 3mL de HNO<sub>3</sub> y 3mL de HF, se llevó al microondas por 2,5 minutos cada muestra, se enfrió por 20 minutos y se adicionó 5mL de HCl, se llevó nuevamente al microondas por 2,5 minutos, se enfrió por 20 minutos y el extracto ácido obtenido se aforó a 100mL con agua destilada; a partir de este se leyó cobre, hierro, plomo, zinc, calcio, magnesio, níquel, cromo, sodio, potasio, aluminio, manganeso, molibdeno, arsénico y antimonio; a través de Absorción Atómica a sus respectivas longitudes de onda.

♣ Pruebas de lixiviación ácida y acuosa. Esta prueba se realiza a minerales que presentan características refractarias. Se pesaron 100g de mineral pulverizado y homogenizado para realizar dos lixivitaciones, una en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de concentración 10g/L y otra en agua destilada, con un porcentajes de sólidos de 33,33%, agitando a 950rpm durante 24 horas, después de la agitación se filtró y en los lixiviados obtenidos se leyó cobre, hierro, plomo, zinc, calcio, magnesio, níquel, cromo, sodio, potasio, aluminio, manganeso, molibdeno, arsénico y antimonio; a través de Absorción Atómica a sus respectivas longitudes de onda.

<sup>65</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Importancia del análisis químico, mineralógico y mineralúrgico de minerales auríferos, Op. Cit., p. 12.

♣ Análisis de azufre como sulfatos. Se pesaron 20mg de mineral pulverizado y homogenizado y se depositaron en un beaker de 50mL, se adicionaron 2mL de una mezcla ácido clorhídrico: ácido nítrico 3:1 y se calentó a 30°C por 60 minutos agitando constantemente, luego se adicionó 0,04mL de peróxido de hidrógeno y se agitó por 15 minutos más, se filtró y lavó con agua caliente hasta observar la desaparición de un color amarillento, se aforó a 100mL. Posteriormente se tomó 10mL del filtrado, se agregó 10mL de la solución inicial ácida de azufre y se agitó; luego se adicionó 4mL de reactivo turbidimétrico agitando hasta homogenizar la muestra. Finalmente se dejó reposar por 20 minutos, se agitó suavemente y se leyó en espectrofotómetro UV-Vis Perkin-Elmer Lambda 11 a una longitud de onda de 420nm en una curva de calibración (Anexo D) con patrones de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15ppm, los cuales se prepararon de la misma manera que las muestras<sup>66</sup>.

#### 4.6 PRUEBAS METALÚRGICAS REALIZADAS A LOS MINERALES

Las metodologías empleadas para los diferentes procedimientos son las establecidas y estandarizadas por el Departamento de Metalurgia Extractiva DEMEX, las cuales se describen a continuación<sup>67</sup>.

4.6.1 Ensayo de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley. Se pesaron 2Kg de mineral y se molieron en molino de bolas por 30 minutos con 1200mL de agua obteniendo un porcentaje de sólidos del 62,5%, luego se recibió la pulpa en un recipiente y se llevó a la mesa concentradora Wilfley, la alimentación de la pulpa se realizó por la parte superior de la mesa la cual se repartió en las zonas de concentrado, concentrado medio, relaves y lamas.

Para la determinación de oro libre se tomaron los de la zona de concentrados, se sedimentó, se eliminó el agua de la pulpa y se platoneó. El oro se amalgamó con Hg para determinar la cantidad de oro libre en la muestra (oro amalgamable). Una vez obtenida la amalgama, se atacó con solución HNO<sub>3</sub> (1:1) obteniendo así el oro, este se lavó con agua destilada, se secó, se calcino y se peso.

4.6.2 Distribución de valores en una prueba de Flotación Bulk. Se pesó 1Kg de mineral y se molió en molino de bolas por 30 minutos con 600mL de agua obteniendo un porcentaje de sólidos del 62,5%, se lavó el molino con 1400mL de agua para obtener un porcentaje de sólidos del 33,33%, la pulpa obtenida se recogió en la celda de flotación Denver D-12, se llevó al agitador mecánico a 1800rpm, se determinó pH y se acondicionó para obtener un pH de trabajo básico adicionando cal. A la muestra en agitación, se adicionó como colector para el oro libre y sulfuros 4 gotas Aerofloat 208 ( $\bar{m}_{\text{gota}} = 0.035\text{g}$ ) y 4 gotas de aceite de pino ( $\bar{m}_{\text{gota}} = 0.019\text{g}$ ) como espumante. Se mantuvo la agitación por 5 minutos, luego se abrió la llave de paso en el agitador para formar la espuma que colecta los metales

---

<sup>66</sup> INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI. Métodos analíticos de laboratorios de suelos. Bogota D.C.: DANE, 6<sup>a</sup> ed, 2006. p. 292.

<sup>67</sup> LOZADA, M. Beneficio de minerales auríferos: Ensayos metalúrgicos. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1986. p. 20-28.

preciosos, una vez retirada la primera fracción Concentrado A; se adicionó 10mL de Amilxantato de potasio (KAX) al 1% y 4 gotas de aceite de pino; se agitó durante 5 minutos a 1800rpm, se retiró la espuma formada; Concentrado B; y los sólidos restantes corresponden al relave R; las fracciones obtenidas se secaron a 80-100°C<sup>68</sup>.

Se homogenizó cada una de las fracciones secas, de cada una de ella se pesaron 30g y se tostaron para realizar ensayo al fuego con el fin de determinar la cantidad de oro presente en cada fracción.

♣ Flotación de afinamiento. La flotación de afinamiento se llevó a cabo en las mismas condiciones que la flotación estándar, sin embargo, se varían los pH y los tiempos de flotación para así obtener la mayor cantidad de compuestos sulfurados en los concentrados de afinamiento; a los cuales se realizó análisis por difracción de rayos X para determinar los compuestos que impiden la liberación del oro. Este procedimiento se realizó dependiendo de las características del mineral obtenidas en el análisis de difracción de Rayos X de cabeza. Las condiciones empleadas para la flotación estándar y de afinamiento, se encuentran en el (Anexo E).

4.6.3 Cianuración estándar por agitación. Para cada una de las muestras, se molió durante 30 minutos 1 Kg de mineral en un molino de bolas a un porcentaje de sólidos de 62,5%, luego se llevó a un porcentaje de sólidos del 33,33%, la pulpa se agitó para el acondicionar el pH (etapa de preaireación) adicionando cal hasta alcanzar el pH de trabajo entre 10,5 y 11,0; posteriormente, se adicionó 2g de NaCN/L<sup>69</sup>; se tomaron muestras periódicas de 15mL; 5 para el control de cianuro y 10 mL para el análisis de oro por absorción atómica a una longitud de onda de 242,8nm. El control de cianuro se realizó por la técnica titulométrica con AgNO<sub>3</sub> 4,33g/L utilizando como indicador KI al 10%, la cal se tituló con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 4,375g/L.

Al finalizar las 24 horas de cianuración, se filtró y se lavo el relave con 1L de agua, se tomó una muestra de estas dos soluciones para analizar oro por Absorción Atómica y determinar la cantidad de oro máxima disuelta en solución de lixiviación. Las lecturas de oro en solución, se realizaron teniendo en cuenta la curva de calibración con patrones de oro en matriz básica (Anexo D); las condiciones empleadas para la cianuración estándar por agitación y el balance metalúrgico, se encuentran en el (Anexo F).

#### 4.7 PRUEBAS DE CIANURACIÓN APLICANDO TRATAMIENTOS OXIDATIVOS Y CIANURACIÓN EN MOLIENDA

Al mineral Playa Dorada, el cual presentó características refractarias, se realizaron pruebas de cianuración aplicando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda, teniendo en

---

<sup>68</sup> LOZADA, M. Beneficio de minerales auríferos: Pruebas de flotación. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1986. p. 15-19.

<sup>69</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E.; DIAZ, X. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Lixiviación con cianuro-cianuración. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. p. 73-95.

cuenta que para cada prueba se realizaron tres repeticiones con su respectivo balance metalúrgico (Anexo G). Dichas pruebas se describen a continuación:

4.7.1 Cianuración estándar por agitación como blanco. Se molió durante 30 minutos 1Kg de mineral en un molino de bolas a un porcentaje de sólidos de 62,5%, luego se llevó a un porcentaje de sólidos del 33,33%, la pulpa se agitó para acondicionar el pH (etapa de preaireación) adicionando cal hasta alcanzar el pH de trabajo entre 10,5 y 11; posteriormente se adicionaron 2g de NaCN/L, se tomaron muestras periódicas de 15mL; 5 para el control de cianuro y 10 mL para el análisis de oro por Absorción Atómica a una longitud de onda de 242,8nm. El control de cianuro se realizó por la técnica titulométrica con  $\text{AgNO}_3$  4,33g/L utilizando como indicador KI al 10%, la cal se tituló con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  4,375g/L.

Al finalizar las 24 horas de cianuración, se filtró y se lavó el relave con 1L de agua, se tomó una muestra de estas dos soluciones para analizar oro por Absorción Atómica.

4.7.2 Cianuración con cianuración en molienda. Se molió 1Kg de mineral a intervalos de 5 minutos, adicionando cal para acondicionar el pH de trabajo, con los resultados obtenidos se obtuvo la cantidad de cal adecuada para llevar a cabo la cianuración con una concentración de 2g NaCN/L.

Una vez determinada la cantidad de cal para acondicionar el pH, se molió con 1Kg de mineral, al cabo de 5 minutos de molienda, se agregó NaCN y continuó la molienda por 25 minutos más; posteriormente, se tomó una alícuota para el control de cianuro y cal y otra para análisis de oro en solución. Finalmente se continuó la cianuración por agitación en las mismas condiciones que la estándar.

4.7.3 Cianuración con inyección de aire. Se molió 1Kg de mineral por 30 minutos a un porcentaje de sólidos de 62,5%, la pulpa se llevó al reactor de agitación con un porcentaje de sólidos de 33,33%, donde se hizo la inyección de aire con ayuda de un compresor y un dispersor a un caudal de  $30 \text{ cm}^3/\text{s}$ , se acondiciono el pH de trabajo y se adicionó NaCN; posteriormente, se continuó la cianuración por agitación en las mismas condiciones que la estándar, la inyección de aire en el reactor de cianuración, se realizó por 24 horas.

4.7.4 Cianuración con Peróxido de sodio  $\text{Na}_2\text{O}_2$ . La cianuración procedió normalmente realizando los mismos controles periódicos de NaCN y cal, pero en el paso de preaireación, se adiciono  $\text{Na}_2\text{O}_2$  en concentración de 5g  $\text{Na}_2\text{O}_2/\text{Kg}$  y se agitó por 30 minutos antes de proceder con la adición de NaCN.

4.7.5 Cianuración con cianuración en molienda más aire. Una vez determinada la cantidad de cal para acondicionar pH, se molió con 1Kg de mineral, al cabo de 5 minutos de molienda, se agregó NaCN y continuó la molienda por 25 minutos más, posteriormente, se tomó una alícuota para el control de cianuro y cal y otra para análisis de oro en solución. Finalmente la pulpa se llevó al reactor de agitación con un porcentaje de sólidos de 33,33%, donde se hizo la inyección de aire con ayuda de un compresor y un dispersor. Se

continúo la cianuración en las mismas condiciones; la inyección de aire se realizó por 24 horas.

4.7.6 Cianuración con previa tostación del mineral. La tostación del mineral, se llevó a cabo en dos etapas utilizando una mufla Nichols. Para la tostación de 10Kg; las condiciones empleadas fueron:

Primera etapa: Tostación en atmósfera reductora a una temperatura de 600°C para prevenir la formación de arseniatos de hierro, durante 3,0 horas; segunda etapa, tostación en atmósfera oxidante a una temperatura 800°C durante 3,0 horas; controlando la temperatura entre los 750 hasta 800°C para oxidar totalmente los sulfuros presentes en la muestra. Al cabo del tiempo de tostación, la muestra se sacó del horno, se enfrió y se llevó a un porcentaje de sólidos de 33,33%; la cianuración procedió normalmente realizando los mismos controles periódicos de NaCN y cal, tomando lecturas para determinar la recuperación de oro en solución.

Figura 3. Flujoograma: caracterización y análisis mineralógico

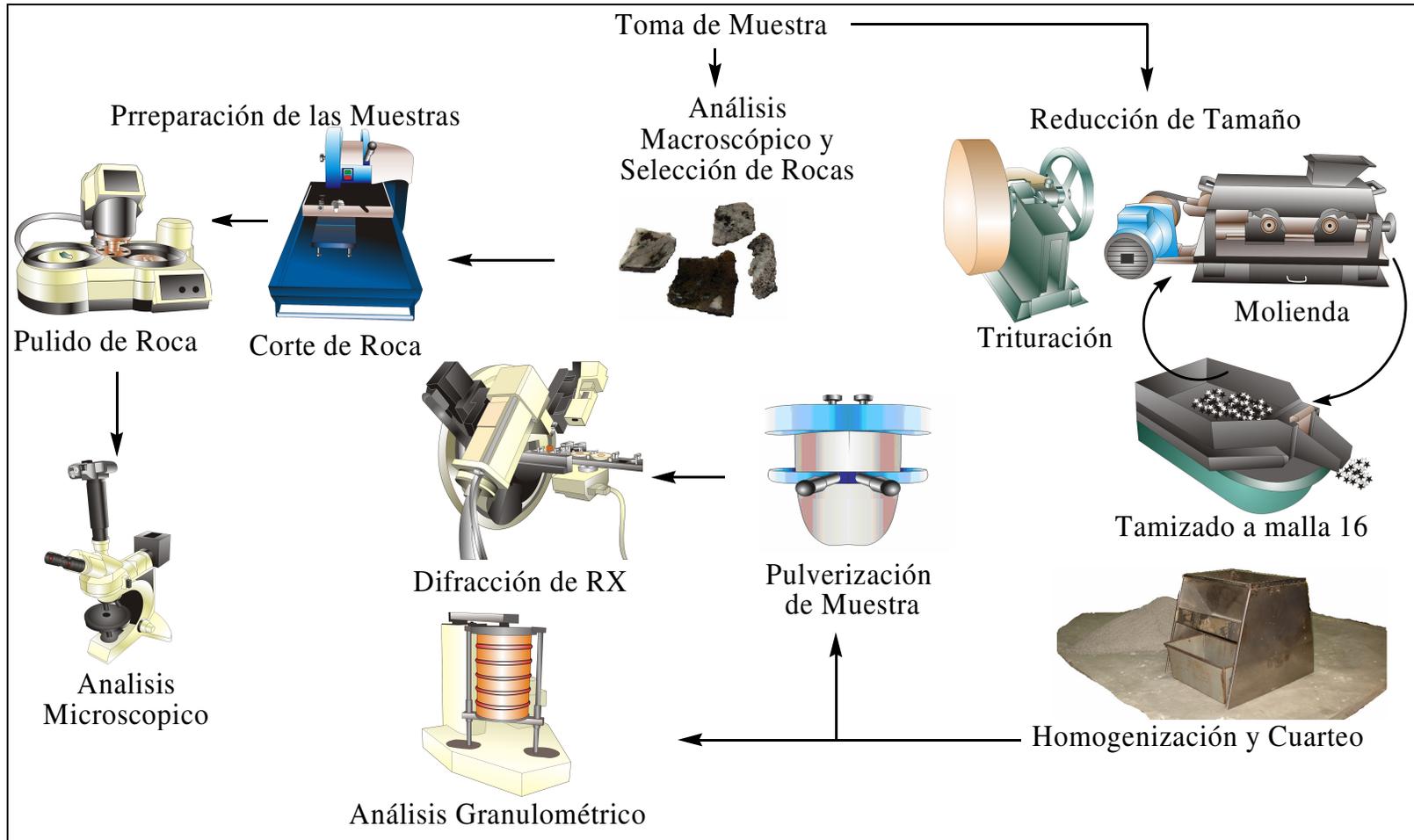


Figura 4. Flujoograma: estudios químicos y pruebas metalúrgicas

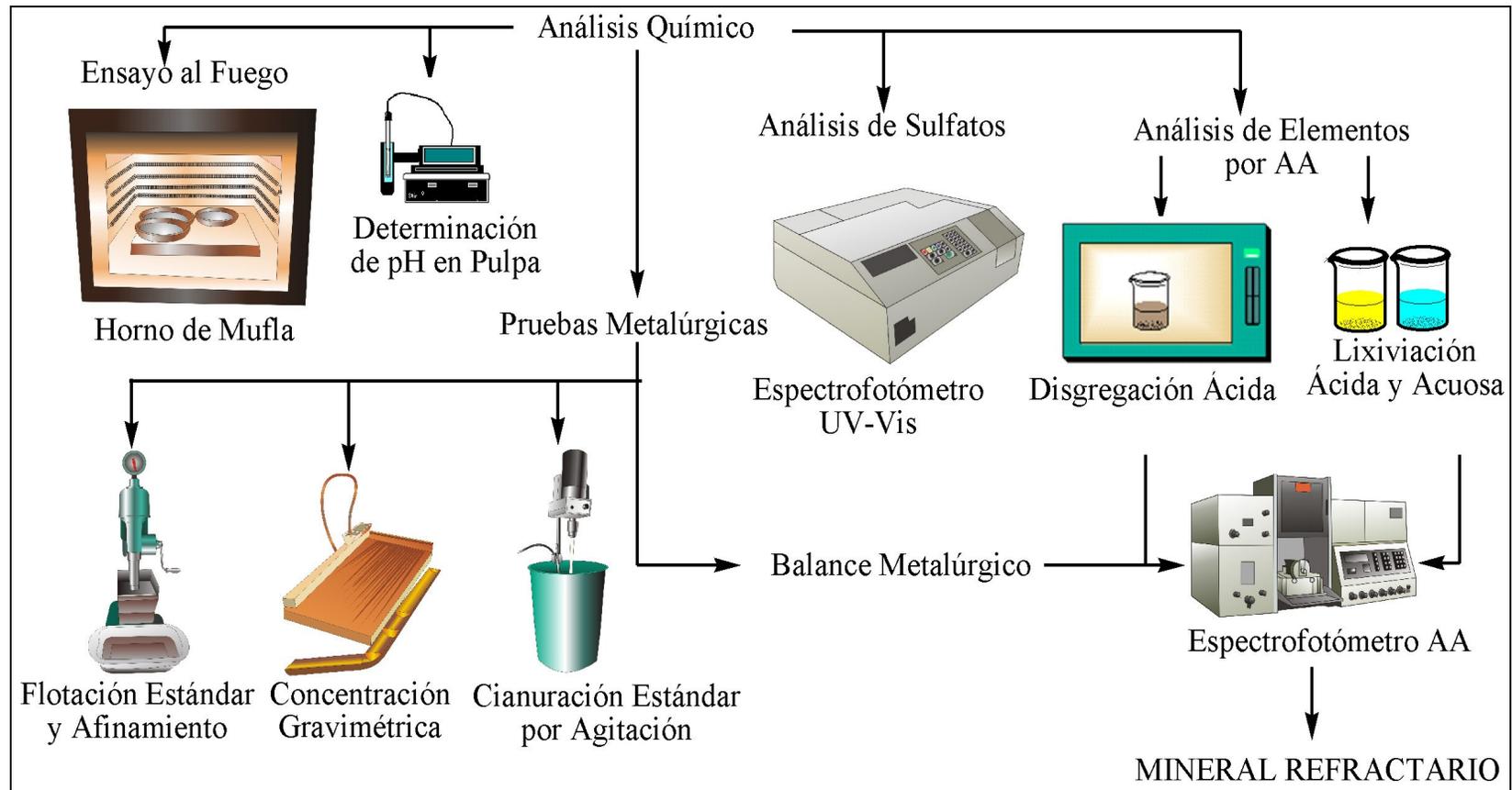
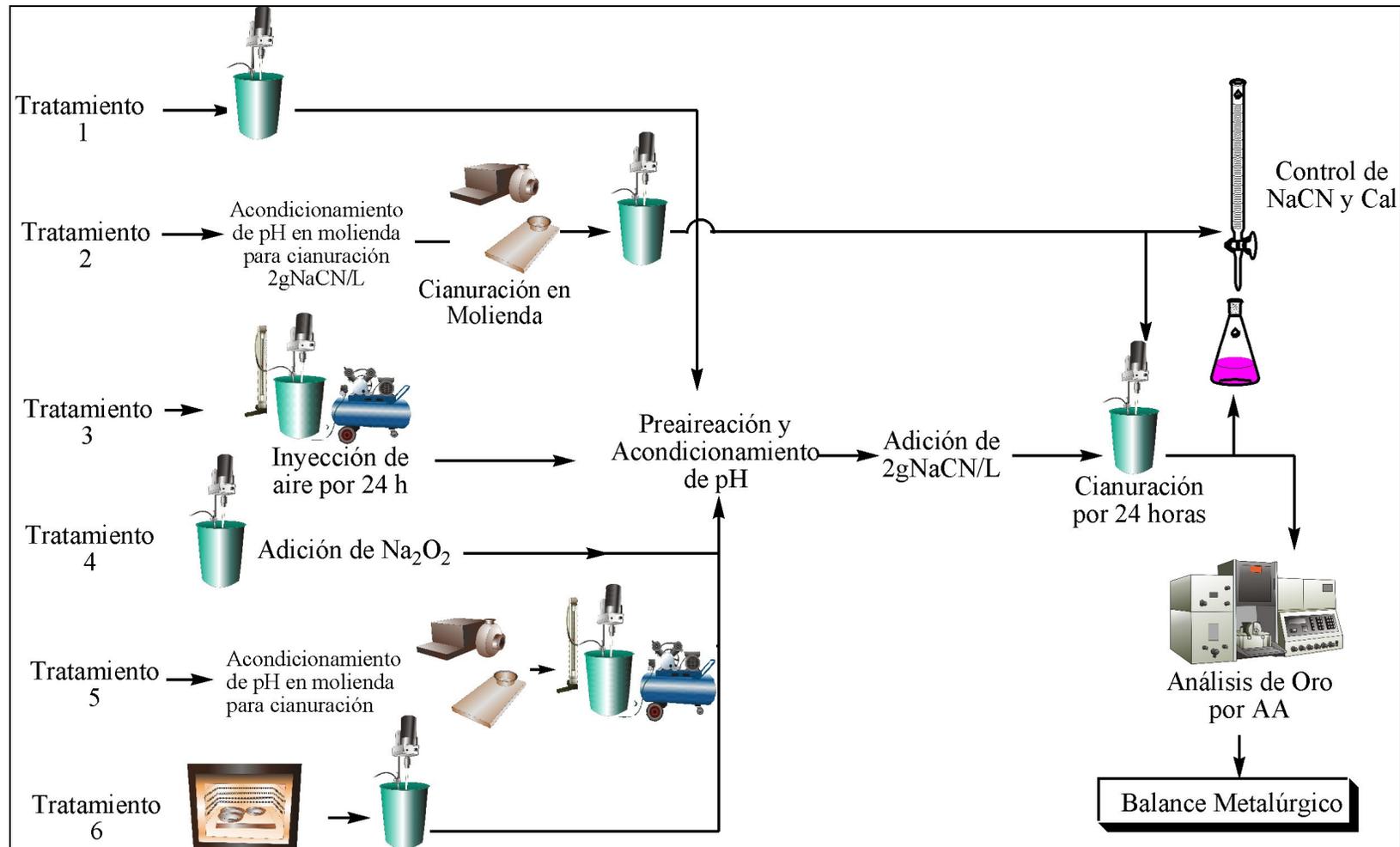


Figura 5. Flujograma: pruebas de cianuración aplicando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

Estos estudios permitieron obtener información que ningún análisis químico podría proporcionar, ya que indicaron la forma en que están asociados los elementos que los componen, la distribución y el porcentaje en que se encuentran, es decir permitió obtener información sobre las diferentes especies mineralógicas encontradas que originan las diferentes complicaciones en el beneficio de los metales preciosos.

5.1.1 Análisis granulométrico. El análisis de tamaño de los minerales obtenido por análisis granulométrico, constituyó una parte fundamental del procedimiento en las pruebas de laboratorio. Este análisis fue de gran importancia para la determinación de la calidad de la molienda y para establecer el grado de liberación de los valores en la ganga en varios tamaños de partícula.

En la tabla 8, se reportan los datos de la prueba de tamices para los minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada de pasado acumulado en cada uno de los tamices, para la determinación del  $d_{80}$  el cual facilita el control de la molienda donde se establece el acumulativo de finos que superan el 80% del tamaño que sí pasan, en cada mineral para un tiempo de molienda de 30 minutos.

Tabla 8. Resultados obtenidos para el análisis granulométrico, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	% Pasado Acumulado			
		El Paraíso	El Páramo	El Canadá	Playa Dorada
80	180	98,81	97,49	97,98	99,16
100	147	95,33	92,16	93,50	98,37
150	104	84,08	79,57	82,54	95,96
200	74	62,51	59,59	62,69	90,17
270	53	45,37	44,05	48,18	78,02
<270	<53	0,00	0,00	0,00	0,00

Después de la molienda en la cual se obtuvo un tamaño de partícula inferior a  $180\mu\text{m}$ , se realizó el análisis granulométrico en el cual se emplearon tamices menores al tamaño obtenido en la molienda.

Para el mineral El Paraíso, El Páramo y El Canadá, el tamiz en el cual se alcanzó un porcentaje de pasado acumulado cercano al 80% fue el N° 150 ( $d_p \leq 104\mu\text{m}$ ), alcanzando un

porcentaje del 84,08 %, 79,57 %, 82,54 % respectivamente. Por lo tanto, el  $d_{80}$  para estos minerales es el tamiz N° 150.

Sin embargo, para el mineral Playa Dorada, el tamiz en el cual se alcanzó un porcentaje de pasado acumulado cercano al 80% fue el N° 270 ( $d_p \leq 53\mu\text{m}$ ), alcanzando un porcentaje del 78,02%. Por lo tanto el  $d_{80}$  para el mineral Playa Dorada es el Tamiz N° 270.

5.1.1.1 Porcentajes de oro en fracción por ensayo al fuego. En la tabla 9, se muestran los datos de porcentaje de oro por ensayo al fuego, obtenidos en cada una de las fracciones a partir del análisis granulométrico de los minerales.

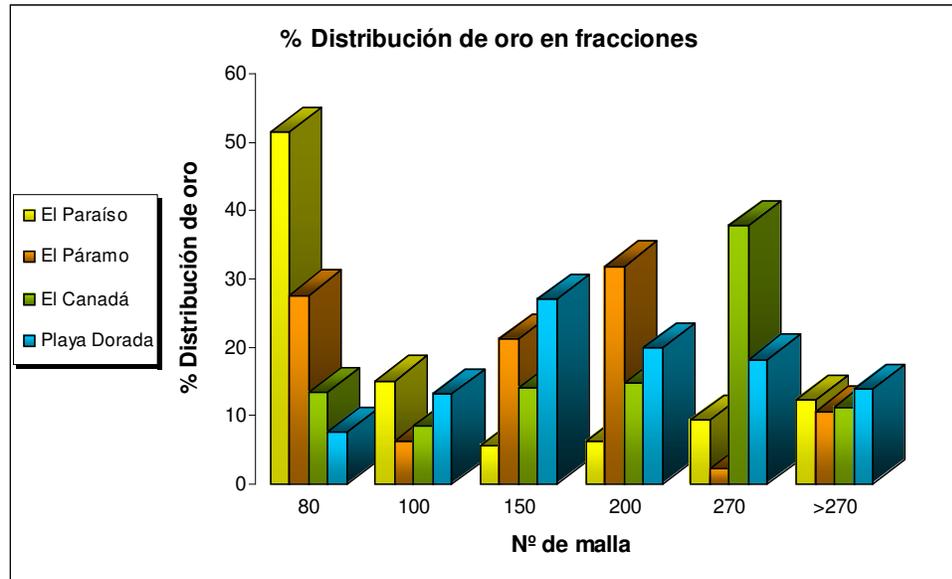
Según la metodología detallada por Alvarez<sup>70</sup>, y como se ve en la tabla 9, el cálculo del rendimiento y porcentaje de la cantidad total de oro contenida en la muestra de cada fracción, indicó una ley media calculada (contenido de oro por fracción en el total de la muestra fracción; ver anexo B) del mineral de partida, la cual no difiere mucho con el resultado obtenido en el ensayo al fuego del mineral de cabeza, por lo tanto, esto infirió un buen grado de representatividad en cada fracción analizada, por esta razón, se concluyó que los análisis obtenidos provienen de una muestra representativa.

Tabla 9. Porcentajes de oro en fracción por análisis granulométrico y ensayo al fuego, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	% Distribución de oro en fracción			
		El Paraíso % Au (g/TM)	El Páramo % Au (g/TM)	El Canadá % Au (g/TM)	Playa Dorada % Au (g/TM)
80+	180	51,42	27,66	13,43	7,66
100	147	15,11	6,38	8,48	13,12
150	104	5,49	21,28	14,13	27,09
200	74	6,29	31,91	14,84	19,96
270	53	9,32	2,13	37,81	18,24
>270	<53	12,36	10,64	11,31	13,93
Ley media calculada		47,58	4,73	15,17	20,98

<sup>70</sup> ALVAREZ, R. Laboratorio de menas: Prácticas de mineralurgia. Madrid: Fundación Gómez-Pardo, 1989. p. 2-3.

Figura 6. Grafico: Distribución granulométrica de oro en cada fracción, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada



Los ensayos al fuego de cada fracción obtenidos por análisis granulométrico, permitieron evidenciar que el mineral El Paraíso, presentó el 51,42% de oro total para la fracción del tamiz N° 80 ( $d_p \leq 180$ ), el cual podría ser recuperado por algún método gravimétrico. En las fracciones restantes hay una distribución no uniforme de oro, ya que en ellas se encuentran partículas mixtas de oro combinadas con otros minerales en diferentes proporciones. El oro distribuido en las fracciones restantes, puede ser recuperado eliminando ciertas interferencias y propiedades que dificultan su recuperación, como son tamaño de partícula, algunas asociaciones con otros minerales, para finalmente optar por el método de concentración y beneficio más adecuado para la recuperación de oro en estas fracciones.

El mineral El Páramo, presentó el 31,91% de oro total para la fracción del tamiz N° 200 ( $d_p \leq 74 \mu\text{m}$ ), y un 27,66% en la fracción del tamiz N° 80 ( $d_p \leq 180 \mu\text{m}$ ), por lo tanto, se sugiere una molienda de acuerdo al  $d_{80}$  determinado en laboratorio para la recuperación por concentración gravimétrica y estudiar la recuperación de oro por métodos hidrometalúrgicos, teniendo en cuenta que estos son los más adecuados en la recuperación del oro presente en tamaños finos como los encontrados para este mineral.

El mineral El Canadá, presentó el 37,81% de oro total para la fracción del tamiz N° 270 ( $d_p \leq 53 \mu\text{m}$ ). Según este análisis, gran parte del oro se encontró en las partículas más finas, por lo tanto es muy difícil recuperar el metal por métodos gravimétricos, ya que en las mallas cercanas al  $d_{80}$  se recuperaría un porcentaje bajo de oro libre; además el oro distribuido en las fracciones restantes podría estar asociado a elementos o también estar presente en tamaños menores a  $15 \mu\text{m}$  que hacen difícil su liberación; según esto, se

recomienda reconocer el tipo de asociaciones para emplear alguno de los métodos de beneficio más adecuado, efectuando procesos de reducción de tamaño para lograr liberar las partículas del metal precioso y exponerlas a los tratamientos hidrometalúrgicos de recuperación.

Para el mineral Playa Dorada, el porcentaje de distribución granulométrico de oro en cada fracción realizado por ensayo al fuego, permitió evidenciar que el mineral presentó el 26,26% de oro total para la fracción del tamiz N° 150 ( $d_p \leq 104 \mu\text{m}$ ), además en las fracciones de menor tamaño el oro está distribuido en porcentajes cercanos, lo que corrobora que el oro se encuentra en un tamaño muy fino. Por tal motivo, no es aplicable la implementación de procesos de concentración gravimétrica, ya que se perdería parte del oro en las colas de concentración. La distribución de oro en las fracciones de menor tamaño se da por las asociaciones cuarcíferas asociadas a su vez a sulfuros como pirrotina, pirita, arsenopirita y calcopirita, entre otras, encontradas en el análisis mineralógico; estas son las asociaciones más frecuentes que interfieren en la liberación y recuperación del oro y las que lo clasifican como mineral refractario. Por lo tanto, para lograr exponer o liberar el oro, se recomienda moler el mineral hasta una granulometría fina, a un  $d_p \leq 104 \mu\text{m}$  logrando liberar las partículas del metal precioso y exponerlas a los tratamientos hidrometalúrgicos de recuperación, teniendo en cuenta las características del mineral.

## 5.2 ANÁLISIS MINERALÓGICO

5.2.1 Difracción de Rayos X. Los resultados de los análisis de cabeza de los minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada se reportan en la tabla 14, la metodología se realizó considerando los procedimientos establecidos por el Departamento de Metalurgia Extractiva DEMEX<sup>71</sup>. Las diferentes fases mineralógicas (Anexo C) se identificaron por comparación de los difractogramas obtenidos con los datos archivados de muestras estándar del banco JCPDS–ICDD (*Joint Committee on Powder Diffraction Standar*) constituido por más de 50.000 difractogramas, en el cual el sistema de búsqueda de la información se encuentra en el ordenador empleando el programa DIFFRAC-PLUS (Bruker), teniendo en cuenta el conocimiento previo de la composición química de la muestra lo que permitió restringir la búsqueda y una mayor seguridad de identificación; la cuantificación de las fases mineralógicas se realizó empleando el software TOPAS Rietveld, el cual se adopta perfectamente al problema de la superposición y permite una cuantificación completa de todas las fases presentes.

Los análisis realizados por difracción de rayos X, permitieron cuantificar las especies mineralógicas en concentraciones superiores al 1% en peso. Este análisis mostró que los minerales El Paraíso, El Páramo y El Canadá, son minerales que no presentan características refractarias ni complicaciones aparentes respecto a su mineralogía; por lo tanto, estos minerales poseen altos contenidos de cuarzo y se consideran minerales

---

<sup>71</sup> GUEVARA, A. Etude minéralogique des minerais équatoriens d'or réfractaires et des produits de leurs traitements minéralurgiques et métallurgiques, Trabajo de grado. Universidad Católica de Lovaina, Bélgica, 2001.

cuarcíferos; sin embargo para el mineral Playa Dorada, se encontró altos porcentajes de pirrotina, calcopirita, presencia de pirita y arsenopirita en porcentajes más bajos, los cuales le confieren características de mineral polisulfurado; clasificándolo como refractario.

Tabla 10. Porcentaje\* de especies mineralógicas presentes en los minerales de cabeza

Material	El Paraíso contenido (%)	El Páramo contenido (%)	El Canadá contenido (%)	Playa Dorada contenido (%)
Cuarzo	63,27	70,38	55,04	24,00
Grupo Plagioclasa (albita, andesita, anortita)	2,25	5,09	5,03	5,00
Muscovita	3,72	4,42	6,82	2,00
Caolinita	18,65	6,43	3,23	7,00
Calcopirita	---	---	---	9,00
Pirita	---	---	1,34	1,00
Calcita	---	---	---	19,00
Clinocloro	---	6,31	11,39	12,00
Covellita	---	---	---	---
Esfalerita	---	---	---	---
Pirrotina	---	2,05	3,05	31,00
Arsenopirita	---	1,24	---	1,00
Estibnita	---	2,24	---	---
Chamosita	---	1,11	5,55	---
Plogopita	---	---	---	---

\* El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida

5.2.2 Análisis con microscopio a luz reflejada. Los análisis realizados a las muestras de los minerales, con el microscopio petrográfico a luz reflejada a un aumento de 20X, realizadas en rocas, permitió observar las especies mineralógicas en cada una de los minerales. Las más comunes encontradas fueron: pirita, arsenopirita, calcopirita y pirrotina.

Tabla 11. Análisis microscópico de la muestra en roca, mineral El Paraíso

Mineral	Color	Observación
Pirita	Blanco	Granos grandes, sin forma, color claro
Calcopirita	Amarillo	Sin forma, granos pequeño alejados unos de otros
Arsenopirita	Blanco Brillante	Cortes geométricos, granos alejados y pequeños
Ganga	Gris oscuro	Se encuentra en la mayor parte de la roca

Figura 7. Identificación de especies mineralógicas. Vista al microscopio de sección pulida (20X), mineral El Paraíso

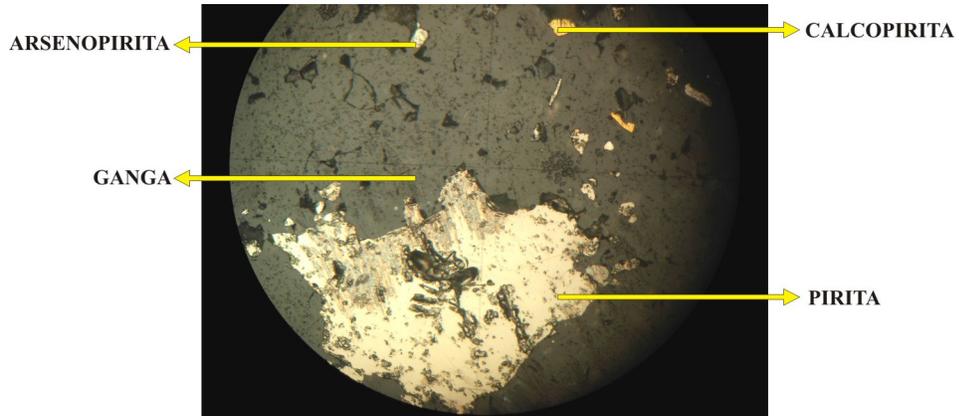


Tabla 12. Análisis microscópico de la muestra en roca, mineral El Páramo

Mineral	Color	Observación
Arsenopirita	Blanco Brillante	Granos grandes que ocupan la mayor parte del lente, con cortes geométricos y color característico.
Calcopirita	Amarillo	Pequeñas concentraciones alejadas unas de otras de color característico, asociadas a arsenopirita.
Ganga	Gris oscuro	Se encuentra en la mayor parte de la roca

Figura 8. Identificación de especies mineralógicas. Vista al microscopio de sección pulida (20X), mineral El Páramo

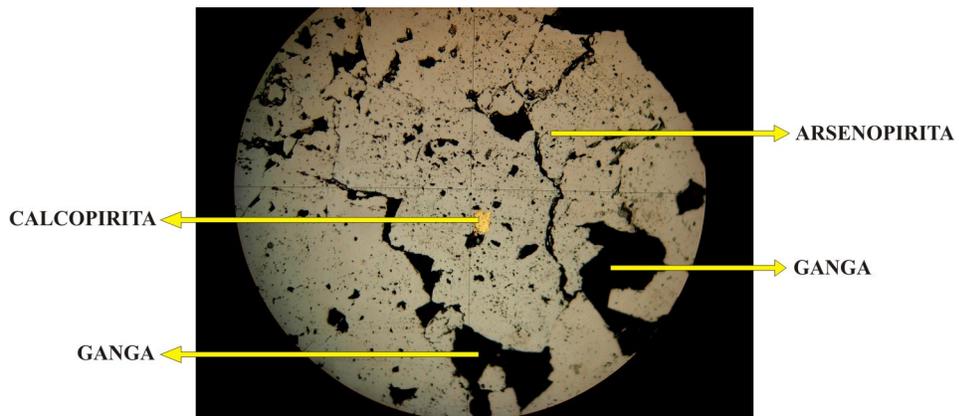


Tabla 13. Análisis microscópico de la muestra en roca, mineral El Canadá

Mineral	Color	Observación
Pirita	Blanco	Granos grandes, sin forma de color claro, rodeados de ganga
Calcopirita	Amarillo	Sin forma, granos pequeño alejados y rodeados de arsenopirita
Arsenopirita	Blanco Brillante	Cortes geométricos, granos de mediano tamaño, distribuidos en gran parte de la roca
Ganga	Gris oscuro	Se encuentra en la mayor parte de la roca

Figura 9. Identificación de especies mineralógicas. Vista al microscopio de sección pulida (20X), mineral El Canadá

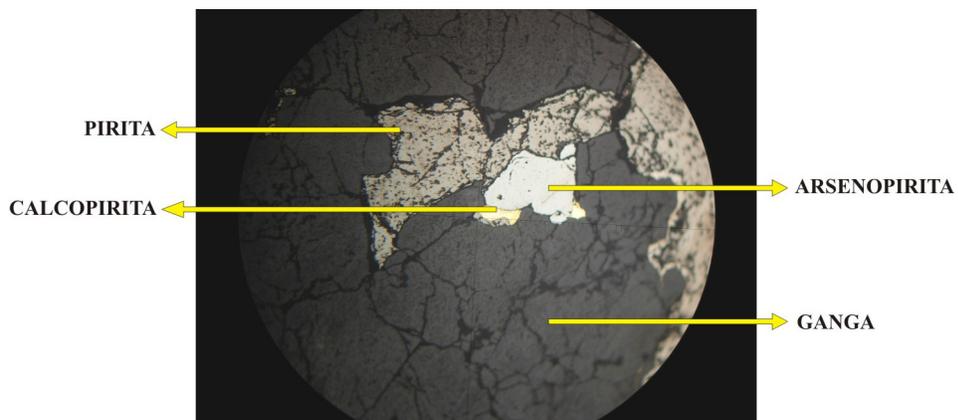
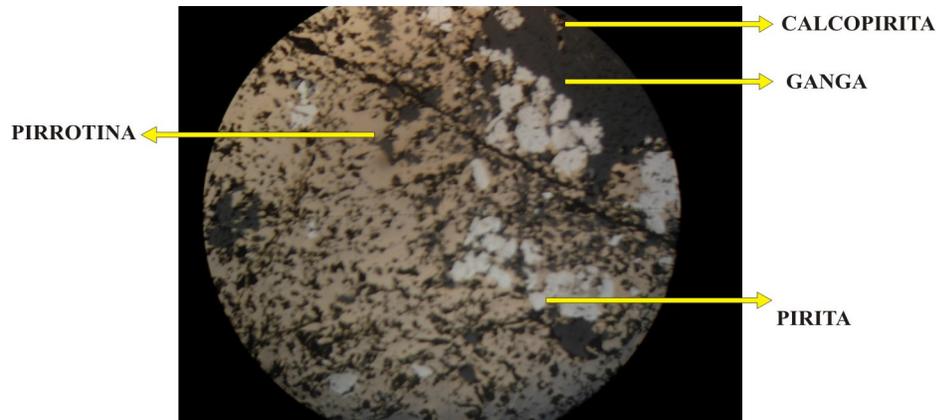


Tabla 14. Análisis microscópico de las muestras en roca, mineral Playa Dorada

Mineral	Color	Observación
Pirrotina	Café claro	Playas grandes con inclusiones oscuras y puntos negros, evidencia de alteraciones, se encuentra en gran parte de la roca
Pirita	Blanco	Granos grandes, atrapados en complejos de pirrotina, distribuidos en partes de la roca.
Calcopirita	Amarillo	Se combinan en ramificaciones con la pirrotina, con inclusiones, evidencia de alteraciones en proceso, distribuida en partes de la roca
Ganga	Gris oscuro	Se encuentra en la mayor parte de la roca

Figura 10. Identificación de especies mineralógicas. Vista al microscopio de sección pulida (20X), mineral Playa Dorada



### 5.3 ESTUDIOS QUÍMICOS

Para el análisis químico, el estudio se basó en minerales de cabeza, concentrados y relaves obtenidos en los ensayos metalúrgicos, además se realizaron determinaciones del contenido de metales (cobre, plomo, zinc, cadmio, arsénico, manganeso, antimonio, cromo) por disgregación y lixiviación. En las muestras de proceso estudiadas, el análisis de los metales preciosos (oro y plata) se realizó por ensayos al fuego y Espectrofotometría por Absorción Atómica, según los métodos sugeridos por De la Torre y Guevara<sup>72</sup>.

5.3.1 Determinación de pH. En la tabla 15, se reportan los pH obtenidos en los minerales El paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada, a un porcentaje de sólidos del 33,33% por 3 horas de agitación.

Como se puede observar en la tabla 15, los minerales presentaron pH ligeramente básico, a un porcentaje de sólidos del 33,33%. Los pH comprendidos entre 7-8, hacen referencia a la ausencia de sales solubles que lo modifiquen en gran medida, sin embargo la variación de este en las muestras indica la presencia de carbonatos responsables de la variación del pH.

Tabla 15. Medidas de pH cada 30 minutos por agitación mecánica

Muestra	Tiempo (h)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Paraíso	pH	6,22	6,80	7,02	7,12	7,19	7,20	7,20
Páramo		7,20	7,40	7,90	8,01	8,01	8,20	8,20
Canadá		6,30	6,30	6,50	6,50	6,80	7,20	7,20
Playa Dorada		6,92	7,40	7,47	7,53	7,56	7,63	7,63

<sup>72</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Importancia del análisis químico y mineralógico de minerales auríferos. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. p. 121.

Según lo anterior, se puede afirmar, que el pH obtenido en cada una de las muestras no influirán en gran medida en el proceso de cianuración ya que el acondicionamiento de pH se lograría con adición de menor cantidad de cal en comparación a minerales con características ácidas<sup>73</sup>, logrando alcanzar con mayor facilidad el pH de trabajo y así una cianuración efectiva, además de evitar el riesgo de que el cianuro se disocie a ácido cianhídrico.

5.3.2 Análisis de oro por ensayo al fuego. Teniendo en cuenta la clasificación mineralógica de los minerales estudiados, se preparó la mezcla del mineral y el flujo necesario para fundirlo y así conocer la cantidad de oro y plata presente en cada mineral, ya sea de cabeza, concentrados y/o relaves<sup>74</sup>.

De acuerdo a la tabla 16, se deduce, que los minerales El Paraíso, El Canadá y Playa Dorada presentan un alto contenido de oro en g/TM, indicando que son minerales ricos, por lo tanto, se puede optar por tratamientos adecuados de recuperación para cada mineral; sin embargo, el mineral El Páramo contiene bajas cantidades de oro y plata en g/TM con respecto a los anteriores minerales, por lo tanto, es importante elegir la conveniencia de su explotación.

Tabla 16. Resultados obtenidos por ensayo al fuego de minerales de cabeza

Mineral	Muestra (g)	Peso Doré(g)	Peso Au(g)	Au (g/TM)	Peso Ag (g)	Ag (g/TM)
El Paraíso	30	0,00163	0,00135	45,00	0,00028	9,33
El Páramo	30	0,00020	0,00013	4,33	0,00007	2,33
El Canadá	30	0,00071	0,00053	17,66	0,00018	6,00
Playa Dorada	30	0,00253	0,00061	20,33	0,00192	64,00

5.3.3 Análisis de elementos por Absorción Atómica y UV Vis.

♣ Disgregación Ácida. Las determinaciones cuantitativas por medio de disgregación ácida y lectura por Absorción Atómica, permitieron hallar la cantidad presente de los elementos analizados, sin embargo, fue muy importante complementar estos análisis con el análisis mineralógico y microscopía petrográfica, para conocer la forma de las asociaciones de dichos metales que conforman los diferentes minerales.

Según los resultados de la tabla 17, se puede afirmar que para los minerales El Paraíso, El Páramo y El Canadá, los elementos analizados no se encuentran en gran cantidad, sin embargo, el sodio, potasio y manganeso, se encuentran presentes en pequeñas cantidades, las cuales podrían ser las responsables en la variación del pH más no en el proceso de cianuración en si. La presencia de los elementos característicos de la refractareidad como

<sup>73</sup> CARDONA, P.; ORDOÑEZ. R. Estudio de la dilución de oro aplicando el proceso de cianuración, carbón activado por agitación CIP, presente en un mineral de la mina La Palmera del Municipio La Llanada del Departamento de Nariño. San Juan de Pasto, 2006, p. 79. Trabajo de grado. Universidad de Nariño.

<sup>74</sup> VASQUEZ GARCIA, J. Op. Cit., p. 18-19.

Cu, Fe, y As, no son de gran importancia en estos minerales, ya que estos se encuentran en porcentajes muy bajos<sup>75</sup>.

Tabla 17. Resultados de disgregación ácida para determinación de elementos en porcentaje peso a peso, minerales El Paraíso (primera fila), El Páramo (segunda fila), El Canadá (tercera fila) y Playa Dorada (cuarta fila)

Cu	Fe	Pb	Zn	Ca	Mg	Ni	Cr	Na	K	Mn	Al	Mo	Sb	As
0,005	0,257	<0,1*	0,002	1,122	0,566	0,002	0,009	8,3	2,25	4,15	0,0026	<0,1*	<0,1*	1,0
0,026	0,513	<0,1*	0,002	0,22	0,215	0,001	0,0016	7,837	1,796	1,856	0,024	<0,1*	<0,1*	0,69
0,041	0,678	<0,1*	0,003	0,92	0,614	0,001	0,0013	9,277	1,746	5,362	0,032	<0,1*	<0,1*	1,82
2,802	6,021	<0,1*	0,022	0,152	0,479	0,001	0,006	15,8	4,4	8,45	0,005	<0,1*	<0,1*	6,92

\*Elementos en concentración menores a 0,1mg/Kg

Los resultados de la tabla 17, indican la presencia de elementos como el cobre, hierro y arsénico, los cuales están en cantidades mayores en el mineral Playa Dorada con respecto a los minerales analizados anteriormente. Dichos elementos son algunos de los principales causantes de refractareidad, dificultando los procesos de extracción y cianuración.

♣ Pruebas de Lixiviación. Los resultados obtenidos para las pruebas de lixiviación ácida y acuosa, se realizaron para la muestra del mineral Playa Dorada, ya que por análisis mineralógico, éste presentó características de refractareidad.

Tabla 18. Resultados de sales solubles analizadas por Absorción Atómica, en lixivaciones ácida (primera fila) y acuosa (segunda fila) en ppm por 24horas

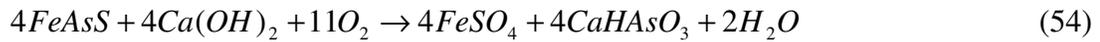
Cu	Fe	Pb	Zn	Ca	Mg	Ni	Cr	Na	K	Mn	Al	Mo	Sb	As
223,5	3368	1	50	250	132	1,68	1,64	591	153	29	121,7	<0,1*	<0,1*	42
0,03	0,04	<0,1*	0,03	250	5,24	<0,01*	<0,01*	45	73	0,25	<0,1*	<0,1*	<0,1*	246

\* Elementos en concentración menores a 0,1 y 0,01mg/L

Los resultados obtenidos en la lixiviación ácida, indicaron la presencia de sales solubles principalmente de hierro, cobre y arsénico y algunos carbonatos de calcio, magnesio, sodio y potasio presentes en el mineral.

En la lixiviación acuosa se encontró principalmente arsénico, una de las evidencias de la presencia de compuestos cianicidas, presentes frecuentemente como minerales arsenicales, siendo la arsenopirita el más importante; estos reaccionan con soluciones alcalinas para producir compuestos que inhiben la disolución del oro, como arsenitos alcalinos afectando los rendimientos en la recuperación de oro según la reacción

<sup>75</sup> QUINTANA, V.; DE LA TORRE E. Cianuración de minerales con alto contenido de arsenopirita y pirita. Quito, 1997, p. 92. Trabajo de Grado. Escuela Politécnica Nacional.



Esta es una reacción fuerte mente desoxidante, lo que resulta en una pérdida de oxígeno disuelto en la solución de lixiviación, consecuentemente, el oro no se disolverá.

Las concentraciones de carbonatos de calcio, magnesio, sodio y potasio encontradas, son las causantes en la variabilidad del pH en el mineral. Además la baja lixiviación de compuestos asociados al oro como los de hierro y cobre (pirita y calcopirita) en solución acuosa, indican las fuertes asociaciones que existen entre estos compuestos y el oro.

Por esta razón, el alto contenido de arsénico en lixiviación acuosa y las fuertes asociaciones de minerales de hierro y cobre en el mineral Playa Dorada, revelan la necesidad del empleo de tratamientos que eliminen la presencia de elementos cianídicos y aumenten la liberación del oro en el proceso de cianuración.

♣ Análisis de azufre como sulfatos. La tabla 19, muestra la concentración de azufre como sulfatos en cada una de las muestras.

Tabla 19. Absorbancia y concentración de azufre como sulfatos en ppm

Mineral	Absorbancia	[ppm]
El Paraíso	0,005	1,76
El Páramo	0,006	1,80
El Canadá	0,012	2,04
Playa Dorada	0,067	4,29

En el análisis realizado, se encontró que la concentración de azufre como sulfatos es baja para los minerales El Paraíso, El Páramo y El Canadá con respecto a la muestra de Playa Dorada, la cual contiene una mayor cantidad de azufre en el mineral. Dicho elemento encontrado puede actuar en la formación de sales cianídicas las cuales consumen cantidades excesivas de cianuro afectando el proceso de cianuración; estos sulfuros metálicos o sulfosales asociados, le confieren al mineral la característica de refractareidad.

## 5.4 PRUEBAS METALÚRGICAS

Las pruebas metalúrgicas realizadas en laboratorio, permitieron identificar la cantidad de oro recuperado en cada muestra y así sugerir y/o descartar la prueba de beneficio más adecuada para cada mineral evaluado. Estas pruebas se llevaron a cabo teniendo en cuenta los resultados encontrados en el análisis mineralógico y químico.

5.4.1 Ensayo de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley. La metodología empleada es la reportada por Lozada, considerando los procedimientos establecidos por el Departamento

de Metalurgia Extractiva. Los resultados obtenidos para el ensayo de concentración gravimétrica, se indican en la tabla 20.

Tabla 20. Resultados obtenidos en mesa de concentración

Muestra	Mineral (Kg)	Au Refinado(g)	Au(g/TM)
El Paraíso	2,0	0,01552	7,76
El Páramo	2,0	0,00188	0,94
El Canadá	2,0	0,00538	2,69
Playa Dorada	2,0	0,00022	0,11

Los resultados de la tabla anterior, indican que en los minerales la recuperación de oro empleando este método es relativamente bajo, teniendo en cuenta que solo se estudia la fase de concentrados, la cual contienen el oro grueso, por esta razón se recomienda estudiar otras alternativas de recuperación del oro libre en los residuos medios y finos ya que por análisis granulométrico se comprobó la presencia de cantidades apreciables de oro en estos.

5.4.2 Distribución de valores en una prueba de flotación. Teniendo en cuenta las características de refractareidad del mineral Playa Dorada, la presencia de pirrotina, arsenopirita, pirita y calcopirita, mostrada por el análisis microscópico y los resultados obtenidos por Difracción de rayos X, se realizó al mineral una distribución de valores en una prueba de flotación, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados.

♣ Flotación estándar. Durante la concentración por flotación estándar, se obtuvieron los siguientes datos; en la fracción **CA**, se muestra un porcentaje de recuperación de oro del 94,49% y una recuperación de plata del 92,35% en 605,50g de mineral; mientras que en las fracciones **CB** y **R** la recuperaciones son muy bajas, por lo tanto la flotación estándar en las condiciones realizadas es un buen método de recuperación de oro para este tipo de minerales. La ley media calculada es cercana al análisis químico por ensayo al fuego, lo cual indica que el análisis es representativo para este el mineral. En la tabla 21, se muestran las distribuciones de oro y plata en las tres fracciones obtenidas por flotación estándar.

Tabla 21. Concentración por flotación estándar y balance metalúrgico, mineral Playa Dorada

Fracción	Peso (g)	% Peso	Au mg/Kg	Au mg	% Rec Au	Ag mg/Kg	Ag mg	% Rec Ag	%Rec * Ley Au
<b>CA</b>	605,50	59,80	21,85	13,23	94,49	74,00	44,81	92,35	2064,71
<b>CB</b>	73,70	7,28	7,02	0,52	3,70	35,00	2,58	5,32	25,94
<b>R</b>	333,40	32,93	0,76	0,25	1,81	3,40	1,13	2,33	1,38
<b>Total</b>	1012,60			14,00	100,00		48,52	100,00	2092,03
Ley media calculada									20,92

♣ Flotación de afinamiento. La tabla 22, indica los resultados obtenidos para la flotación de afinamiento en el mineral Playa Dorada, modificando las condiciones operatorias.

Tabla 22. Flotación de afinamiento y balance metalúrgico, mineral Playa Dorada

Fracción	Peso (g)	% Peso	Au mg/Kg	Au mg	% Rec Au	Ag mg/Kg	Ag mg	% Rec Ag	%Rec * Ley Au
<b>Cf</b>	455,80	45,65	19,00	8,66	72,17	110,00	50,14	76,34	1371,17
<b>R A<sub>2</sub></b>	121,60	12,18	20,00	2,43	20,25	85,00	10,34	15,74	405,00
<b>R A<sub>1</sub></b>	44,10	4,42	8,00	0,35	2,92	58,00	2,56	3,90	23,33
<b>Rf</b>	377,0	37,76	1,50	0,56	4,67	7,00	2,64	4,02	7,00
<b>Total</b>	998,50	100,00		12,00	100,00		65,68	100,0	1806,50
Ley media calculada									18,07

Donde:

**Cf:** Concentrado final.

**R A<sub>2</sub>:** Relave afinamiento 2.

**R A<sub>1</sub>:** Relave de afinamiento 1.

**Rf:** Relave final.

La recuperación de Au alcanzada en el concentrado final es del 72,17 %; en el concentrado final más el Relave de Afinamiento 2 se tiene el 92,3 % en 577,4g de mineral. Por esta razón, la concentración de afinamiento es empleada para concentrar la mayor parte del oro y sulfuros en una pequeña cantidad de material, para así poder ser tratada posteriormente con mayor facilidad por cianuración, o tuesta y cianuración. Por lo tanto la flotación del mineral Playa Dorada mejora y presenta facilidades a la concentración por flotación de afinamiento.

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en las fracciones de flotación de afinamiento, se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffract Plus para cualificación y cuantificación utilizando metodologías de patrón interno, basadas en la intensidad de reflexión de la fase analizada con otra de una sustancia patrón añadida a la muestra en proporción conocida y constante, donde el calibrado se obtuvo con patrones de mezclas sintéticas preparadas añadiendo a la matriz cantidades conocidas y variables de la fase analítica y una cantidad fija de patrón interno. A continuación se detallan los resultados obtenidos del análisis.

Tabla 23. Determinación\* de los compuestos presentes en las fracciones de afinamiento

Material	Concentrado Final (%)	Relave A <sub>2</sub> (%)	Relave A <sub>1</sub> (%)	Relave final (%)
Cuarzo	8,00	10,02	58,0	65,03
Muscovita	7,00	4,02	3,01	1,06
Caolinita	3,00	5,02	8,0	4,07
Calcopirita	14,00	6,05	1,01	---
Plogopita	8,00	4,07	---	1,08
Calcita	7,00	1,05	---	---
Clinocloro	3,00	10,01	16,00	21,03
Pirrotina	47,00	55,02	13,00	6,01
Esfalerita	---	2,04	---	---
Grupo Plagioclasa (albita, andesita, anortita)	---	---	---	2,08

\*El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida

Según los datos obtenidos en la tabla 23, para la determinación de los compuestos con cristalización definida por difracción de rayos X presentes en las fracciones de flotación donde se obtuvieron en el concentrado final porcentajes menores de cuarzo, recuperaciones importantes de los sulfuros de interés como calcopirita y pirrotina, entre otros componentes; dichos sulfuros son los más importantes asociados al oro en el mineral Playa Dorada. Estas recuperaciones se lograron gracias a la selectividad de los sulfuros según las condiciones de afinamiento empleadas. Como se ve en los resultados, la concentración en porcentaje de cuarzo aumenta conforme transcurre el afinamiento, llegando hasta el 65% en el relave final. Este análisis y las recuperaciones mencionadas en la tabla 26, hacen clasificar al mineral como un mineral adecuado para concentrar por flotación, ya que en la flotación estándar y de afinamiento, los metales más densos junto con la mayor parte del metal de interés se concentraron en las primeras fracciones.

5.4.3 Cianuración estándar por agitación. La metodología que se llevó a cabo para la cianuración, fue la descrita por Guevara, De la Torre y Díaz, de La Escuela Politécnica Nacional de Quito-Ecuador.

En la tabla 24, se reportan los datos de recuperación de oro en solución final obtenidos por Absorción Atómica, determinando en esta prueba, el carácter refractario de las muestras aplicando cianuración estándar por agitación.

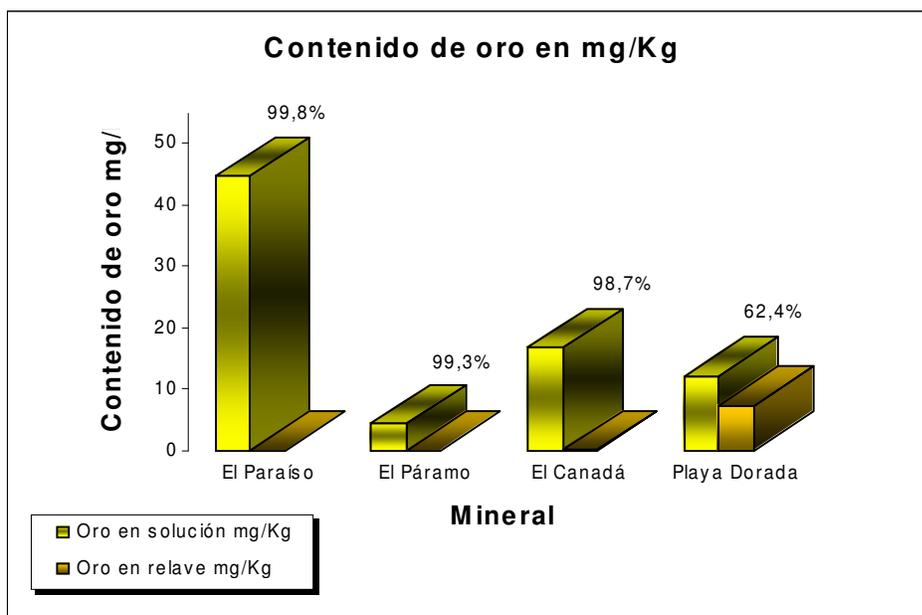
Tabla 24. Recuperación de oro en solución final aplicando cianuración estándar

Mineral	% Recuperación de oro solución final	Au Sol (mg/Kg)	Au R (mg/Kg)
El Paraíso	99,80	44,69	0,10
El Páramo	99,30	4,46	0,03
El Canadá	98,70	16,84	0,22
Playa Dorada	62,40	12,21	7,36

El porcentaje de oro en la solución final, corresponde a la suma del porcentaje de oro en las soluciones fuerte y de lavado (Anexo B); donde la solución fuerte es la solución que se obtiene después del proceso de cianuración en 24 horas y la solución de lavado es la solución obtenida después de lavar el relave con un volumen conocido de agua.

Los datos obtenidos en la tabla anterior, indican que el mineral Playa Dorada, presenta características de refractareidad, ya que el porcentaje de recuperación de oro en solución final no superó el 80%, razón por la cual se emplearon tratamientos para mejorar el porcentaje de recuperación de oro en solución final en este mineral.

Figura 11. Gráfico: Recuperación de oro en solución final aplicando cianuración estándar



Según la figura 11, se deduce que el porcentaje de recuperación es alto para los minerales provenientes del Distrito Minero de La Llanada-Nariño (cercano al 100%); además el oro contenido en los relaves es mínimo, sin embargo, el mineral Playa Dorada, presenta un bajo porcentaje de recuperación de oro en solución y pérdidas en el relave, debido a la presencia de compuestos que impiden extraer directamente el oro ya que no se consigue una

disolución completa en la solución cianurada, confirmando así las características refractarias del mineral.

## 5.5 CIANURACIÓN POR AGITACIÓN APLICANDO TRATAMIENTOS OXIDATIVOS Y CIANURACIÓN EN MOLIENDA

Los tratamientos empleados para el mineral Playa Dorada, el cual presentó características de refractareidad, se realizaron teniendo en cuenta los análisis mineralógicos y ensayos metalúrgicos; además el análisis químico por ensayo al fuego permitió conocer la cantidad de oro en los relaves y junto con la solución final determinar la alimentación recalculada, la cual es cercana al ensayo al fuego de cabeza para este mineral.

En la tabla 25, se reportan los datos promedio obtenidos para la recuperación de oro en solución final y relave, para los tratamientos empleados en el mineral Playa Dorada.

Tabla 25. Datos promedio de la recuperación de oro en solución final y relave, aplicando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda

Ensayo	% Recuperación de oro en solución final	Au Solución (mg/Kg)	Au Relave (mg/Kg)	Consumo Kg/TM	
				NaCN	CaO
Sin tratamiento	62,86	12,35	7,30	16,7	2,95
En molienda	64,95	12,48	6,73	14,02	4,92
Inyección de aire	64,30	12,04	6,67	17,67	10,31
Peróxido de sodio	73,10	14,16	5,21	13,71	8,15
Molienda más aire	64,00	12,51	7,04	15,11	8,23
Tostación oxidante	91,63	18,05	1,63	13,04	6.13

De acuerdo a la tabla 25, se puede determinar que el porcentaje de recuperación de oro en solución para la cianuración sin tratamiento es relativamente bueno, sin embargo, el consumo de cianuro en la cianuración sin tratamiento, cianuración con inyección de aire, cianuración en molienda y cianuración en molienda más aire, fue alto, debido a que los compuestos cianicidas están presentes en la muestra y no hay ningún tratamiento químico que modifique esta característica que involucra un incremento en el gasto de reactivos, tanto de cianuro como de cal.

Por otra parte, la adición de peróxido de sodio como tratamiento en la cianuración aumentó el porcentaje de recuperación de oro y disminuyó el consumo de cianuro, sin embargo, se hace evidente el aumento en el consumo de cal en comparación a las cianuraciones sin tratamiento. Esto es una desventaja para minerales que presentan carácter refractario y bajos contenidos de oro que no justifiquen la demanda en el consumo de reactivos.

Para la cianuración con tostación oxidante, se obtuvo un alto porcentaje en la recuperación de oro en solución final en comparación a los otros tratamientos empleados, además el

consumo de cianuro disminuyo y el consumo de cal es aceptable para un tratamiento en el cual se alcanzan altas recuperaciones de oro. Cabe destacar que la tostación es uno de los métodos mas empleados a nivel mundial para el tratamiento y recuperación de oro en minerales auríferos refractarios<sup>76</sup>.

5.5.1 Recuperación de oro en solución de lixiviación. La cinética de cianuración permite determinar el tiempo necesario para logra la mayor recuperación de oro en solución, al igual que conocer el comportamiento del mineral en cianuración por agitación y así disminuir los tiempos y costos de reactivos en la recuperación de oro<sup>77</sup>.

En la tabla 26, se reportan los datos obtenidos para cada una de las cianuraciones con cada tratamiento, teniendo en cuenta que el porcentaje de oro se da en la solución de lixiviación por 24 horas.

Tabla 26. Datos promedio de porcentaje de oro en solución de lixiviación para la cianuración estándar y tratamientos aplicados

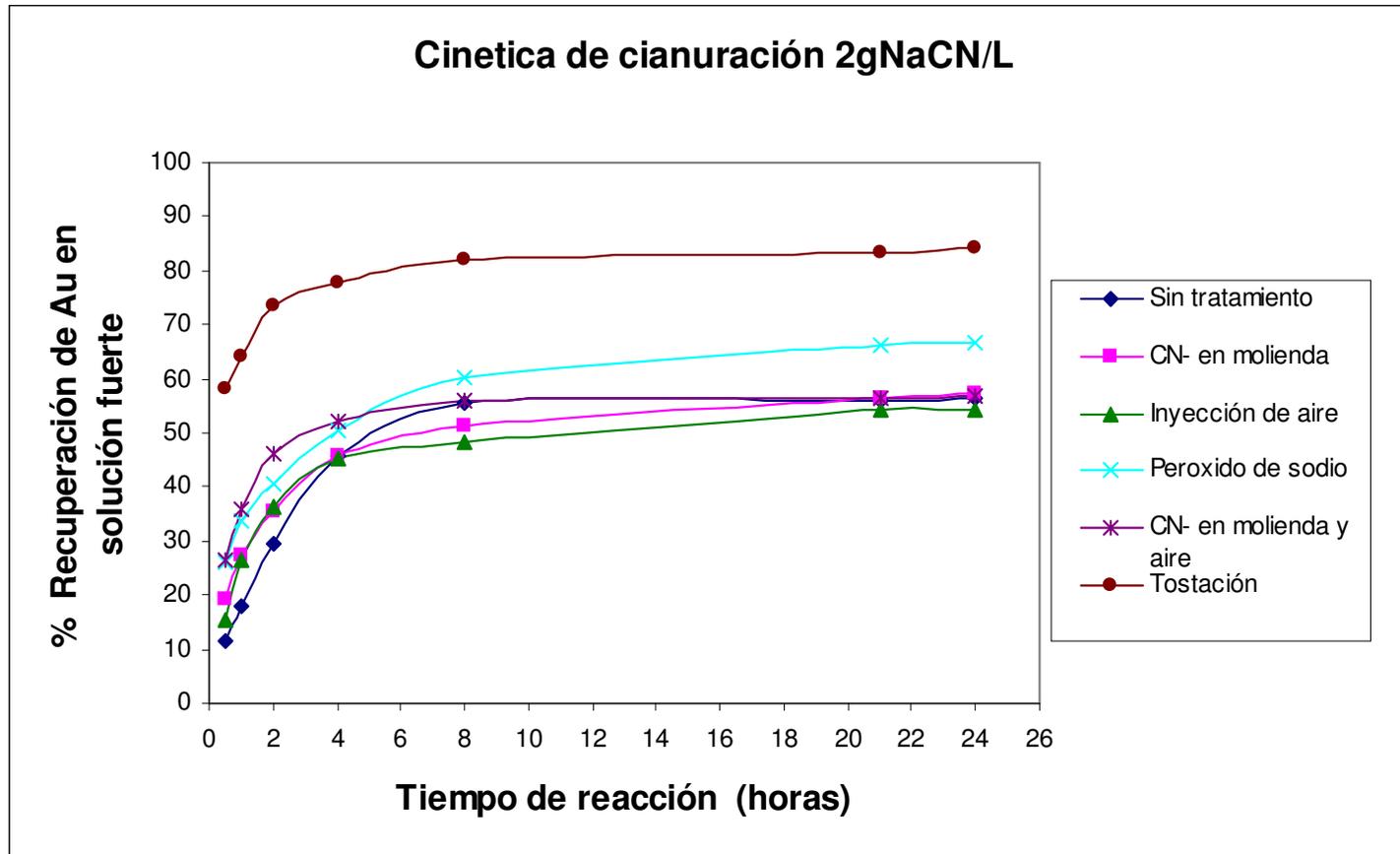
Tiempo en horas	Sin tratamiento	En molienda	Inyección de aire	Peróxido Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Molienda más aire	Tostación oxidante
0,5	11,60	19,23	15,33	26,03	26,40	58,20
1	17,90	27,20	26,43	33,59	35,69	64,03
2	29,43	35,66	36,48	40,51	46,25	73,60
4	45,63	45,66	45,31	50,62	51,98	77,73
8	55,57	51,48	48,40	60,43	56,08	82,00
21	56,10	56,25	54,14	66,13	56,46	83,33
24	56,50	57,31	54,21	66,83	57,00	84,03
Alimentación recalculada	19,66	19,21	18,87	19,36	19,55	19,63

Según la tabla anterior, se puede deducir que el empleo de algunos tratamientos mejoran la recuperación de oro, aumentando los porcentajes de disolución y por lo tanto la recuperación de oro en el mineral. Los datos de alimentación recalculada confirman la representatividad de los análisis, ya que en estos se refleja la cantidad de oro presente en la muestra, la cual es cercano al análisis de cabeza por ensayo al fuego de los distintos minerales, siendo este el oro total en el sistema en cada tratamiento.

<sup>76</sup> OUDENNE, P. Seminario de Tostación. Lima: TECSUP, Ago.1990. p. 22-43.

<sup>77</sup> GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Lixiviación con cianuro-cianuración Quito: Escuela Politécnica Nacional. p. 70.

Figura 12. Gráfico: Cinéticas de cianuración con datos promedio de porcentaje de oro en solución para la cianuración estándar y tratamientos aplicados



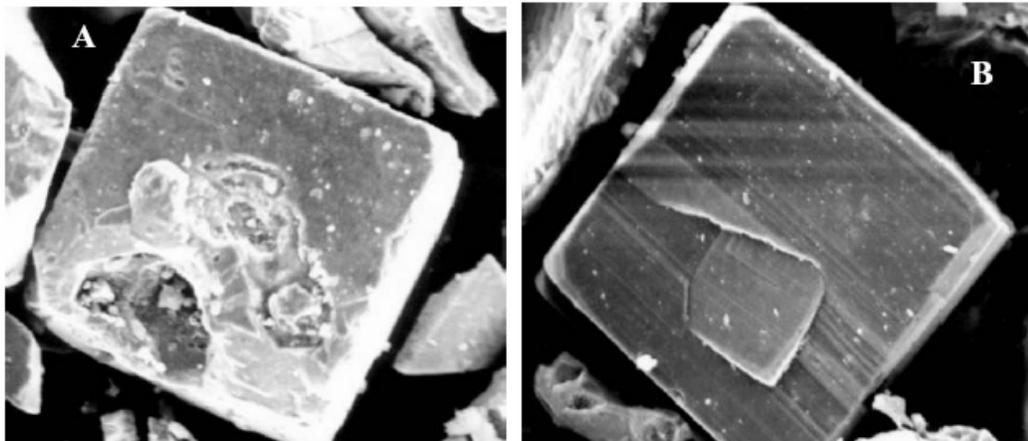
Como se puede ver en el la figura 12, las cinéticas de cianuración, se comportaron de manera esperada, ya que el control de cianuro y cal se mantuvo durante todo el proceso; sin embargo, los porcentajes de recuperación para la cinética de oro en solución fuerte con inyección de aire, cianuración en molienda más aire y cianuración sin tratamiento, son bajos, (54,21%), (57,0%) y (56,5%) respectivamente.

Por otro lado, la cinética de cianuración con cianuración en molienda permitió una recuperación ligeramente mayor que las anteriores (57,31%), sin embargo, la recuperación obtenida no fue la esperada.

Por otra parte, la cianuración con adición de peróxido de sodio y cianuración con previa tostación oxidante, permitieron obtener mejores resultados en la recuperación de oro en solución fuerte (66,83%) y (84,03%) respectivamente, siendo la tostación el tratamiento más adecuado en la recuperación de oro para el mineral Playa Dorada, el cual presentó características refractarias.

Cabe resaltar, que el peróxido de sodio al ser un oxidante fuerte atenúa la superficie de los sulfuros, los cuales son los principales consumidores de cianuro y oxígeno, además de incrementar la cantidad de oxígeno disuelto lo cual se apreció en el mejoramiento de la disolución de oro y en la ligera disminución del tiempo de disolución, evitando que el cianuro sea consumido por reacciones secundarias.

Figura 13. Partículas de mineral cianurado durante 48 h, partículas de mineral cianurado A) con oxidación; B) sin oxidación



SALINAS, E.; RIVERA, I.; CARRILLO, F.; HERNANDEZ, L. Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. México: Centro de Investigaciones en Materiales y Metalurgia: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2004. p. 315-320.

Por último, para poder entender el comportamiento del mineral con y sin oxidación, los autores<sup>78</sup>, han estudiado las partículas de mineral cianuradas para observar su estructura después de la cianuración.

La figura 13, muestra partículas del mineral con y sin oxidación cianuradas en 48h de reacción. En estas imágenes se observa claramente que existe un mayor grado de alteración de la estructura de las partículas oxidadas, lo que permite asumir que esta alteración es causada por la oxidación producida por el peróxido al igual como sucede con la oxidación con ozono, la cual es capaz de generar sitios activos, cavidades y porosidad por donde el cianuro puede penetrar con mayor facilidad y acomplejar con mejores resultados al oro encapsulado en las partículas de pirrotina y calcopirita presentes en el mineral.

Por otra parte, el tratamiento de tostación tiende a liberar el oro de los minerales portadores, eliminando elementos volatilizables como el azufre, arsénico, carbón, etc; y produciendo una calcina con elevada porosidad, tal como se muestra en la figura 14 obtenida por microscopía electrónica de barrido en microscopio electrónico LEICA STEREOSCAN 260; de modo que la solución cianurada pueda tener acceso al oro retenido.

Figura 14. Microscopia electrónica SEM del relave de cianuración del producto tostado en dos etapas, mineral Playa Dorada, donde se observa hematita porosa.



En la práctica, los minerales refractarios portadores de oro (pirrotina, calcopirita, pirita, arsenopirita, etc.), fueron tostados en dos etapas previas a la cianuración. La primera etapa reductora entre 500 y 600 °C, y la segunda etapa oxidante entre 700 y 800 °C. El mecanismo

---

<sup>78</sup> SALINAS, E.; RIVERA, I.; CARRILLO, F.; HERNANDEZ, L. Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurados con ozono. México: Centro de Investigaciones en Materiales y Metalurgia: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2004. p. 315-320.

propuesto por Swash<sup>79</sup> para este proceso, sugiere una transformación inicial de la pirita y arsenopirita en pirrotina, y luego, la oxidación de ésta formando hematita porosa, eliminándose por volatilización el arsénico y el azufre del mineral. El mismo autor, señala que bajo condiciones reductoras o en atmósferas ricas en azufre, la pirita se descompone en pirrotina y azufre mediante un proceso de termo-desulfuración.

La tostación en dos etapas, genera productos tostados con mayor superficie específica, que incrementa la accesibilidad de las soluciones lixiviantes y por ende la recuperación del oro de minerales auríferos refractarios; sin embargo, la efectividad de estos resultados también dependen de la constitución y características de los minerales.

## 5.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados obtenidos anteriormente para el mineral Playa Dorada, se sometieron a un análisis estadístico en el cual se determinaron los resultados más significativos.

Tabla 27. Datos del porcentaje de recuperación de oro en solución final para cada tratamiento

Tratamiento		% Recuperación de oro	Au Solución (mg)	Au Relave (mg)
Sin tratamiento	1	63,30	12,43	7,22
	1	62,40	12,21	7,36
	1	62,90	12,40	7,33
En molienda	2	65,20	12,51	6,68
	2	65,10	12,52	6,71
	2	64,56	12,40	6,81
Inyección de aire	3	64,10	11,87	6,64
	3	64,64	12,09	6,62
	3	64,18	12,16	6,79
Peróxido de sodio Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4	73,80	14,69	5,22
	4	73,01	14,01	5,18
	4	72,51	13,77	5,22
Molienda más aire	5	64,20	12,88	7,19
	5	63,54	12,37	7,10
	5	64,26	12,28	6,83
Tostación oxidante	6	91,40	17,42	1,63
	6	91,50	18,05	1,67
	6	92,00	18,69	1,58

Se verificó la normalidad en los datos, para ello se aplicó la prueba de la normalidad de Shapiro-Wilk; la cual es una de las pruebas con mayor sensibilidad a la no Normalidad.

<sup>79</sup> SWASH, P.M.; ELLIS, P. Proceedings of the Inter: Conference on Gold. Johannesburg: SAIMM, 1986. p. 235-257.

Las propiedades como la normalidad de los resultados reportados y la homogeneidad de las varianzas, son requisitos para obtener un resultado válido del análisis de varianza; si al menos una de estas propiedades no se cumple, se realiza alternativamente una prueba no paramétrica<sup>80</sup>.

Para la prueba de normalidad, se tiene como hipótesis:

H<sub>0</sub>: La muestra proviene de una población con distribución normal.

H<sub>i</sub>: La muestra no proviene de una población con distribución normal.

Tabla 28. Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk, para los porcentajes de recuperación de oro en solución final

Xi	Grados de libertad (k)	Parámetro requerido (b)	W*	W	
				95%	99%
18 valores comprendidos desde 62,4 hasta 92,0	9	35,50	0,676	0,897	0,858
$\bar{O} = 1262,60$					
$X = 70,14$					

Xi: Es porcentaje de recuperación de oro

W\*: Valor estadístico calculado

W: Valores estadísticos tabulados al 95% y 99%

Si  $W^* < W$  se rechaza H<sub>0</sub>, puesto que valores pequeños indican falta de normalidad en la población.

De acuerdo a la regla de decisión, como los valores de W para un límite de confianza del 95% y 99% son mayores que W\*; se rechaza H<sub>0</sub>, lo cual indica que los datos no provienen de una población con distribución Normal.

5.6.1 Análisis de varianza no paramétrico para tratamientos. Para el desarrollo del análisis de varianza no paramétrico para tratamientos<sup>81</sup> se plantean las siguientes hipótesis:

H<sub>0</sub>: No existen diferencias entre tratamientos.

H<sub>i</sub>: Existen diferencias entre tratamientos.

En este procedimiento, se realizó un análisis de varianza simple para el porcentaje de recuperación de oro en solución final y se comparo los valores medios de porcentaje de recuperación para los 6 diferentes tratamientos. La prueba F, comprueba si hay alguna diferencia significativa entre las medias.

<sup>80</sup> DIAZ, A. Diseño estadístico de experimentos. Medellín: Universidad de Antioquia, 1999. p. 37-39.

<sup>81</sup> MILLER, N.J.; MILLER, J.C. Estadística y Quimiometría para Química Analítica. Madrid: Pearson Education, 2002. p. 62-71.

La tabla 29, muestra los valores estadísticos de porcentaje de recuperación de oro en solución final para cada uno de los 6 tratamientos. El análisis de la varianza simple se utilizó principalmente para comparar las medias de los diferentes niveles.

Tabla 29. Medias obtenidas para el porcentaje de recuperación de oro en solución final en cada tratamiento

Tratamientos	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar S
1.Sin tratamiento	3,00	62,87	0,20	0,45
2. En molienda	3,00	64,95	0,12	0,34
3. inyección de aire	3,00	64,31	0,08	0,29
4. Peróxido Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3,00	73,11	0,42	0,65
5. molienda más aire	3,00	64,00	0,16	0,40
6. Tostación oxidante	3,00	91,63	0,10	0,32
Total	18,00	70,14	109,95	10,49

La tabla 29 del ANOVA, descompone la varianza del porcentaje de recuperación de oro en solución final en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de los grupos. El F, que en este caso es igual a 2074,33, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos.

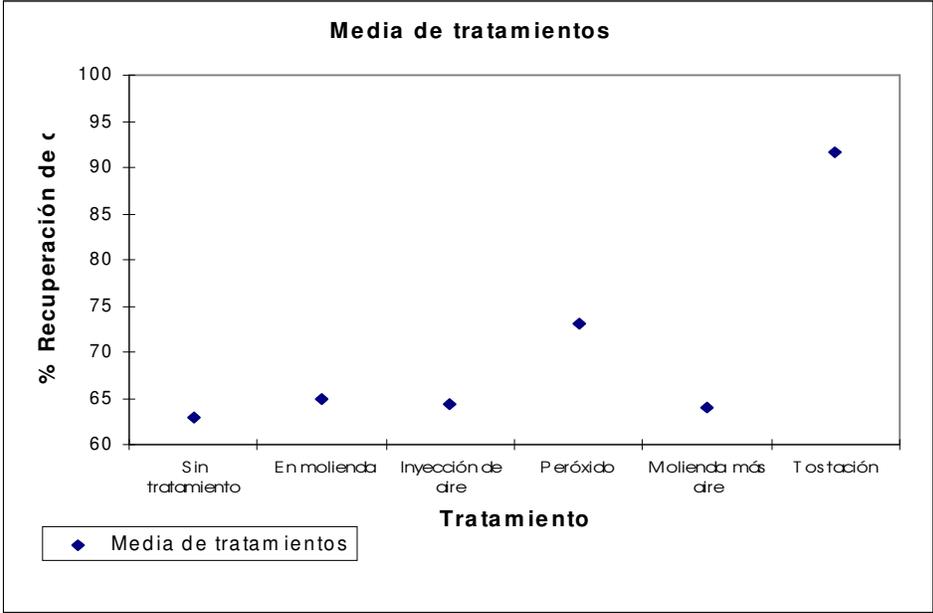
Tabla 30. Análisis de varianza para los datos del porcentaje de recuperación de oro en solución final

Fuente	Sumas de cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Cociente-F
Entre grupos	1866,88	5	373,38	2074,33
Intra grupos	2,19	12	0,18	
Total		17		

El valor crítico  $F_{5,12}$  es igual a 3,11 ( $P=0,05$ ); ya que el valor calculado es mayor que este, se rechaza la hipótesis nula y se acepta  $H_i$ , concluyendo, que hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias del porcentaje de recuperación de oro en solución final de un tratamiento a otro; para un nivel de confianza del 95,0%.

Finalmente, se tiene en cuenta que todos los tratamientos aplicados proporcionan porcentajes de recuperación de oro en solución final diferentes y se puede optar por recomendar el tratamiento con el cual se recuperan mayores porcentajes de oro en solución final; en este caso como se observa en la figura 10, los tratamientos que permiten una mejor recuperación de oro en solución final para el mineral Playa Dorada son cianuración con adición de peróxido de sodio y cianuración con previa tostación, siendo este último el tratamiento en el que se alcanza la mayor recuperación de oro.

Figura 15. Grafico: Medias de tratamientos para el mineral Playa Dorada



## 6. CONCLUSIONES

En el desarrollo de la presente investigación se conoció mediante diferentes estudios mineralógicos, las principales características y composición de las muestras “El Paraíso”, “El Canadá” y “El Páramo” provenientes de la región de la Llanada, Nariño y “Playa Dorada” de Machala, Ecuador; de esta manera, los tres primeros minerales se clasificaron como cuarcíferos y el último como mineral polisulfurado de carácter refractario; además a través de los análisis granulométricos y los ensayos al fuego se estableció la distribución de oro en diferentes fracciones y finalmente con la realización de pruebas metalúrgicas de concentración gravimétrica, flotación y cianuración, se determinaron diferentes niveles de recuperación de oro con lo que se pueden sugerir recomendaciones sobre los métodos más adecuados de beneficio para cada uno de los minerales estudiados.

Según los resultados obtenidos en los estudios mineralógicos y análisis químicos, con las técnicas de ensayo al fuego, absorción atómica y ultravioleta visible, se puede afirmar que los minerales “El Paraíso”, “El Canadá” y “Playa Dorada” poseen altos tenores de oro, teniendo en cuenta que en el mineral “Playa Dorada”, el metal precioso se encuentra asociado a hierro, cobre, arsénico y azufre provenientes de especies minerales como pirrotina, calcopirita, piritita y arsenopirita, de conocida refractareidad que ocasionan bajas recuperaciones de oro en el proceso de cianuración convencional.

Las pruebas metalúrgicas aplicadas a los cuatro minerales y sus características mineralógicas, permitieron identificar las variables más importantes de los procesos a fin de lograr una buena recuperación de oro. En efecto, para el mineral refractario de “Playa Dorada” que contiene alta cantidad de sulfuros se realizó una concentración por flotación estándar y posterior afinamiento con buenos resultados de recuperación de oro.

Los resultados obtenidos en la prueba metalúrgica de cianuración estándar en los minerales “El Paraíso”, “El Páramo” y “El Canadá”, provenientes de la región minera de La Llanada en el Departamento de Nariño, alcanzaron recuperaciones de oro en solución cercanas al 100%, indicando la conveniencia de esta prueba frente a las realizadas por concentración gravimétrica en este tipo de minerales.

Con las pruebas de cianuración estándar se posibilitó la confirmación de la característica de refractareidad del mineral “Playa Dorada”, específicamente evaluando su recuperación de oro en la solución final y teniendo en cuenta los contenidos de oro en las arenas residuales (relave); con lo cual, se tomó la decisión de seleccionar este mineral como objeto de estudio a fin de determinar la cinética de cianuración con la aplicación de tratamientos químicos oxidativos, tostación previa y cianuración en molienda.

Los resultados obtenidos en la cianuración con tostación previa, cianuración con tratamientos químicos oxidativos y con cianuración en molienda; indican que el mejor método para la recuperación de oro en solución final fue el de tostación previa del mineral 'Playa Dorada', la cual se realizó en dos etapas: tostación en atmósfera reductora y tostación en atmósfera oxidante, dando como resultado un porcentaje promedio de recuperación de oro en solución final de 91,63% en comparación al promedio obtenido sin tratamiento de 62,87%.

## 7. RECOMENDACIONES

En el departamento de Nariño a pesar de existir un amplio rango de ambientes favorables para la formación de depósitos auríferos de interés económico, las cifras de producción de oro, en las últimas décadas, no reflejan su verdadero potencial. Por lo tanto, se recomienda en primera instancia realizar estudios geológicos y mineralógicos en diferentes sitios de interés en la zona andina minera nariñense. Igualmente, es prioritario adelantar investigaciones minero metalúrgicas a nivel de laboratorio y planta piloto con tecnologías modernas de concentración gravimétrica y flotación y con la aplicación de la técnica de cianuración con tratamientos químicos oxidativos. Especialmente, se recomienda implementar la cianuración para los minerales provenientes de las minas “El Paraíso”, “El Páramo” y “El Canadá” del Distrito Minero de La Llanada, con los cuales se obtuvieron, en la presente investigación, altos niveles de recuperación que hace viable su aprovechamiento económico.

La cianuración, en un futuro próximo, será la técnica preferida entre los mineros nariñenses por su sencillez y poca inversión de capital, por lo que se recomienda realizar una campaña de capacitación, con el apoyo de instituciones estatales, dirigida a los Grupos Asociativos de Mineros y Mineros Individuales sobre la técnica de cianuración. Otros aspectos a abordar deberán ser el correcto manejo de las diferentes sustancias químicas que se utilizan en el método de cianuración y adecuada disposición de los materiales residuales.

En el corto plazo, se recomienda implementar las siguientes medidas con el objeto de optimizar el actual proceso de cianuración en las minas activas de percolación:

- Realizar un tratamiento previo a la cianuración mediante lavajes con agua fresca con el objeto de inhibir agentes cianicidas y reductores que ocasionan consumos altos de cianuro y en algunos casos producen la destrucción total del mismo.
- ♣ Procesar arenas de grano uniforme que facilite una buena percolación y una efectiva disolución de los metales preciosos.
- ♣ Realizar un monitoreo permanente a las soluciones de cianuro y a los residuos de cianuración en las minas activas, para determinar sus niveles de concentración y riesgos de envenenamiento de personas y aguas.

## BIBLIOGRAFÍA

ALVAREZ, R. Laboratorio de menas: Prácticas de mineralurgia. Madrid: Fundación Gómez-Pardo, 1989. 56p.

BALLESTER, A.; VERDEJA, L.; SANCHO, J. Metalurgia extractiva fundamentos: Vol I. Madrid: Síntesis, 2000. 322p.

BALLESTER, A.; VERDEJA, L.; SANCHO, J. Metalurgia extractiva fundamentos: Vol 2. Madrid: Síntesis, 2000. 602p.

CARDONA, P.; ORDOÑEZ, R. Estudio de la dilución de oro aplicando el proceso de cianuración, carbón activado por agitación CIP, presente en un mineral de la mina La Palmera del Municipio La Llanada del Departamento de Nariño. San Juan de Pasto, 2006. Trabajo de grado. Universidad de Nariño. 142p.

CAZA REINOSO, J. Cianuración de las arenas-relave de la mina de Ponce Enríquez para la extracción de oro y plata. Quito, 1995. Trabajo de grado. Escuela Politécnica Nacional. 278p.

CORNELIUS, K. Manual of Mineralogy. USA: John Willey & Sons, 1999. 379p.

CORPONARIÑO, Centro Minero Ambiental Sotomayor. Diagnóstico minero ambiental del distrito minero La Llanada, Departamento de Nariño: Proyecto aplicación de tecnologías apropiadas para disminuir la contaminación ocasionadas por mercurio y cianuro en los municipios de Sotomayor, Cumbitara, Mallama, Guachavez, La Llanada y Samaniego del Departamento de Nariño. San Juan de Pasto. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007. 55p.

DE LA TORRE, E. Folleto de metalurgia extractiva. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2002. 182p.

DIAZ, A. Diseño estadístico de experimentos. Medellín: Universidad de Antioquia, 1999. 347p.

DOMIC, E. Lixiviación TL: Nuevo proceso hidrometalúrgico. Santiago de Chile: Boletín Minero, 1985. 59p.

DORR, J. V. N.; BOSQUI, F. L. Cyanidation and concentration of gold and silver ores. New York: McGraw-Hill. Book Co., 1980. 289p.

ESCOBAR ALVAREZ, J.; ECHEVERRY VILLA, A. Notas sobre minería de veta y cianuración. Medellín: Fundación Escobar & Cía. LTDA. 1990. 335p.

ESPI, J.A. El libro de la minería del oro en Iberoamérica. Madrid: Monterreina, S.A., 2001. 398p.

GAVIRIA, C.; GARCIA, E.; SANCHEZ, Z. Procesamiento de minerales auroargentíferos: Fundamentos y generalidades. Medellín: Universidad Nacional, 1992. 218p.

GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Pretratamientos empleados para minerales auríferos. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. 231p.

GUEVARA, A. Etude minéralogique des minerais équatoriens d'or réfractaires et des produits de leurs traitements minéralurgiques et métallurgiques. Trabajo de grado. Universidad Católica de Lovaina, Bélgica, 2001. 216p.

GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Importancia del análisis químico y mineralógico de minerales auríferos. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. 231p.

GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: La tostación como pretratamiento de minerales auríferos refractarios. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. 231p.

GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E.; DIAZ, X. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Lixiviación con cianuro-cianuración. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. 231p.

GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Minerales auríferos refractarios. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. 231p.

GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E.; QUINTANA, V. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Pretratamientos oxidativos hidrometalúrgicos para minerales auríferos refractarios polisulfurados. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2005. 231p.

GUEVARA, A.; DE LA TORRE, E. Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados: Pretratamientos oxidativos hidrometalúrgicos para minerales auríferos refractarios polisulfurados. Quito: escuela Politécnica Nacional, 2005. 231p.

HRUSCHKA, F. Manejo Ambiental en la Pequeña Minería. Bolivia: Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, 1998. 302p.

INGEOMINAS. Instituto de Investigaciones en Geociencias; Minería y Química: Inventario minero del Departamento de Nariño. Bogota: Ministerio de minas y Energía, 2004. 242p.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI. Métodos analíticos de laboratorios de suelos. Bogota D.C.: DANE, 6<sup>a</sup> ed, 2006. 392p.

LENAHAN, W.C.; MURRAY, R. Assay and analytical practice in the South African: Mining Industry. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001. 641p.

LITTEN, P.; HALSALL, J. Pyrometallurgy 87. London: The Inst.of Min. and Met, 1987. 802p.

LOZADA, M. Beneficio de minerales auríferos: Ensayo al fuego. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1986. 52p.

LOZADA, M. Beneficio de minerales auríferos: Ensayos metalúrgicos. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1986. 73p.

LOZADA, M. Beneficio de minerales auríferos: Pruebas de flotación. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1986.

MARCHESE, A. Minería: Optimización del proceso de cianuración con reactivos químicos. No 33 (ene.-mar. 2001). 39p.

MARSDEN, J.; HOUSE, I. The chemistry of gold extraction: Series in metals and associated materials. Inland: Elles Horwood, 1992. 398p.

MEZA, L. A.; GAVIRIA, A. Procesamiento de minerales auroargentíferos; extracción y recuperación de metales preciosos. Medellín: Ministerio de Minas y Energía, 1981. 110p.

MILLER, N. J.; MILLER, J.C. Estadística y Quimiometría para Química Analítica. Madrid: Pearson Education, 2002. 249p.

MISARI, F. S. Metalurgia del oro: Fundamentos básicos de la cianuración. Perú: Centro de Estudios y Promoción en Ciencias de la Tierra, 1993. 336p.

OUDENNE, P. Seminario de Tostación. Lima: TECSUP, Ago.1990. 58p.

QUINTANA, V.; DE LA TORRE E. Cianuración de minerales con alto contenido de arsenopirita y pirita. Quito, 1997. Trabajo de Grado. Escuela Politécnica Nacional. 158p.

QUIROZ, G. Guía ambiental para el manejo del cianuro. Lima: Ministerio de Energía y Minas: Dirección General de Asuntos Ambientales, 1992. 486p.

SALINAS, E.; RIVERA, I.; CARRILLO, F.; HERNANDEZ, L. Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. México: Centro de Investigaciones en Materiales y Metalurgia: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2004. 322p.

SWASH, P.M.; ELLIS. P. Proceedings of the Inter: Conference on Gold. Johannesburg: SAIMM, 1986. 402p.

VASQUEZ GARCIA, J. Procesamiento de minerales auríferos: El control analítico en el procesamiento de minerales. Bogota: Ministerio de Minas y Energía, 1994. 30p.

WILLS, B.A. Tecnología de procesamiento de minerales: Tratamiento de menas y recuperación de minerales. México: Limusa, 1987. 568p.

## ANEXOS

Anexo A. Análisis granulométrico, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada.

Resultados obtenidos para el análisis granulométrico, mineral El Paraíso

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	(g) Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
80	180	23,7	1,19	1,19	98,81
100	147	69,1	3,47	4,66	95,33
150	104	223,9	11,25	15,91	84,08
200	74	429,2	21,57	37,48	62,51
270	53	341,1	17,14	54,62	45,37
<270	<53	902,9	45,37	100,0	0,0
Alimentación Calculada		1989,9	100,0		
Alimentación		2000			

Resultados obtenidos para el análisis granulométrico, mineral El Páramo

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	(g) Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
80	180	49,9	2,51	2,51	97,49
100	147	106	5,33	7,84	92,16
150	104	250,1	12,58	20,43	79,57
200	74	397,2	19,98	40,41	59,59
270	53	308,7	15,53	55,94	44,05
<270	<53	875,6	44,06	100	0
Alimentación Calculada		1987,5	100		
Alimentación		2000			

Resultados obtenidos para el análisis granulométrico, mineral El Canadá

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	(g) Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
80	180	40,2	2,03	2,03	97,98
100	147	89	4,48	6,51	93,5
150	104	217,4	10,95	17,47	82,54
200	74	394	19,85	37,31	62,69
270	53	288,1	14,51	51,83	48,18
<270	<53	956,3	48,18	100	0
Alimentación Calculada		1985	100		
Alimentación		2000			

Resultados obtenidos para el análisis granulométrico, mineral Playa Dorada

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	(g) Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
80	180	16,8	0,84	0,84	99,16
100	147	15,6	0,78	1,63	98,37
150	104	48	2,41	4,04	95,96
200	74	115,2	5,79	9,83	90,17
270	53	241,8	12,15	21,98	78,02
<270		1552,6	78,02	100,0	0,0
Alimentación Calculada		1990	100,0		
Alimentación		2000			

Anexo B. Balance metalúrgico para análisis de oro en fracciones, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada.

Calculo de porcentajes de oro en fracción por análisis granulométrico y ensayo al fuego, mineral El Paraíso

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	Peso	% en peso	Au (g/TM)	% Peso * ley	Rendimiento (%)	% Au (g/TM)
80	180	23,7	1,19	237,13	282,43	5,94	51,42
100	147	69,1	3,47	69,67	241,93	5,08	15,11
150	104	223,9	11,25	25,33	285,01	5,99	5,49
200	74	429,2	21,57	29,00	625,50	13,15	6,29
270	53	341,1	17,14	43,00	737,09	15,49	9,32
<270	<53	902,9	45,37	57,00	2586,33	54,35	12,36
Alimentación calculada		1989,9					
Totales			100,0	461,13	4758,28	100,0	100,0
Ley media calculada					47,58		

Calculo de porcentajes de oro en fracción por análisis granulométrico y ensayo al fuego, mineral El Páramo

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	Peso	% en peso	Au (g/TM)	% Peso * ley	Rendimiento (%)	% Au (g/TM)
80	180	49,9	2,51	8,67	21,76	4,60	27,66
100	147	106,	5,33	2,00	10,67	2,25	6,38
150	104	250,1	12,58	6,67	83,90	17,72	21,28
200	74	397,2	19,98	10,00	199,85	42,22	31,91
270	53	308,7	15,53	0,67	10,36	2,19	2,13
<270	<53	875,6	44,06	3,33	146,85	31,02	10,64
Alimentación calculada		1987,5					
Totales			100,0	31,34	473,38	100,0	100,0
Ley media calculada					4,73		

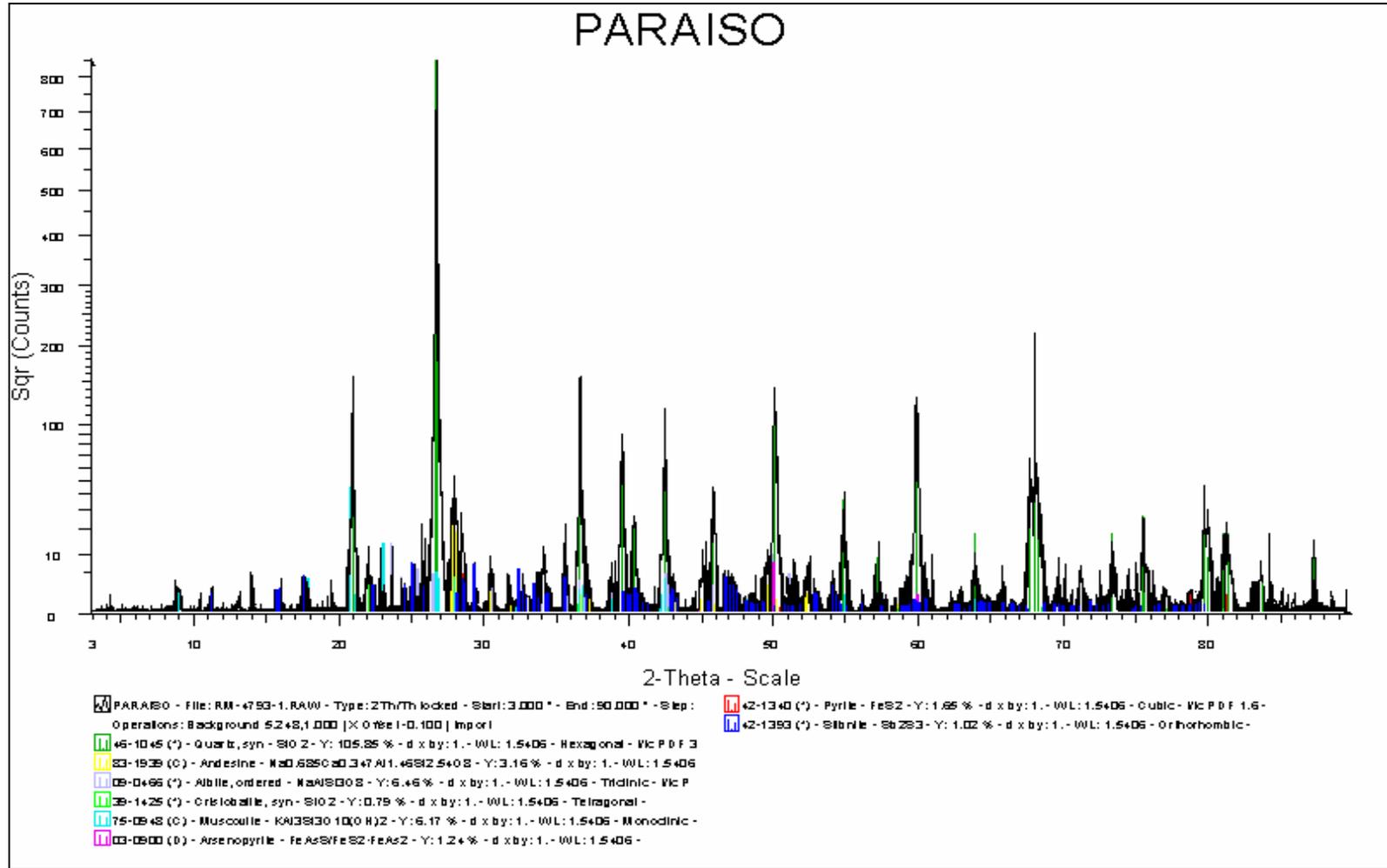
Calculo de porcentajes de oro en fracción por análisis granulométrico y ensayo al fuego, mineral El Canadá

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	Peso	% en peso	Au (g/TM)	% Peso * ley	Rendimiento (%)	% Au (g/TM)
80	180	40,2	2,03	12,67	25,66	1,69	13,43
100	147	89,0	4,48	8,00	35,87	2,36	8,48
150	104	217,4	10,95	13,33	145,99	9,62	14,13
200	74	394,0	19,85	14,00	277,88	18,32	14,84
270	53	288,1	14,51	35,67	517,71	34,12	37,81
<270	<53	956,3	48,18	10,67	514,04	33,88	11,31
Alimentación		1985,0					
			100,0	94,34	1517,15	100,0	100,0
Ley media calculada					15,17		

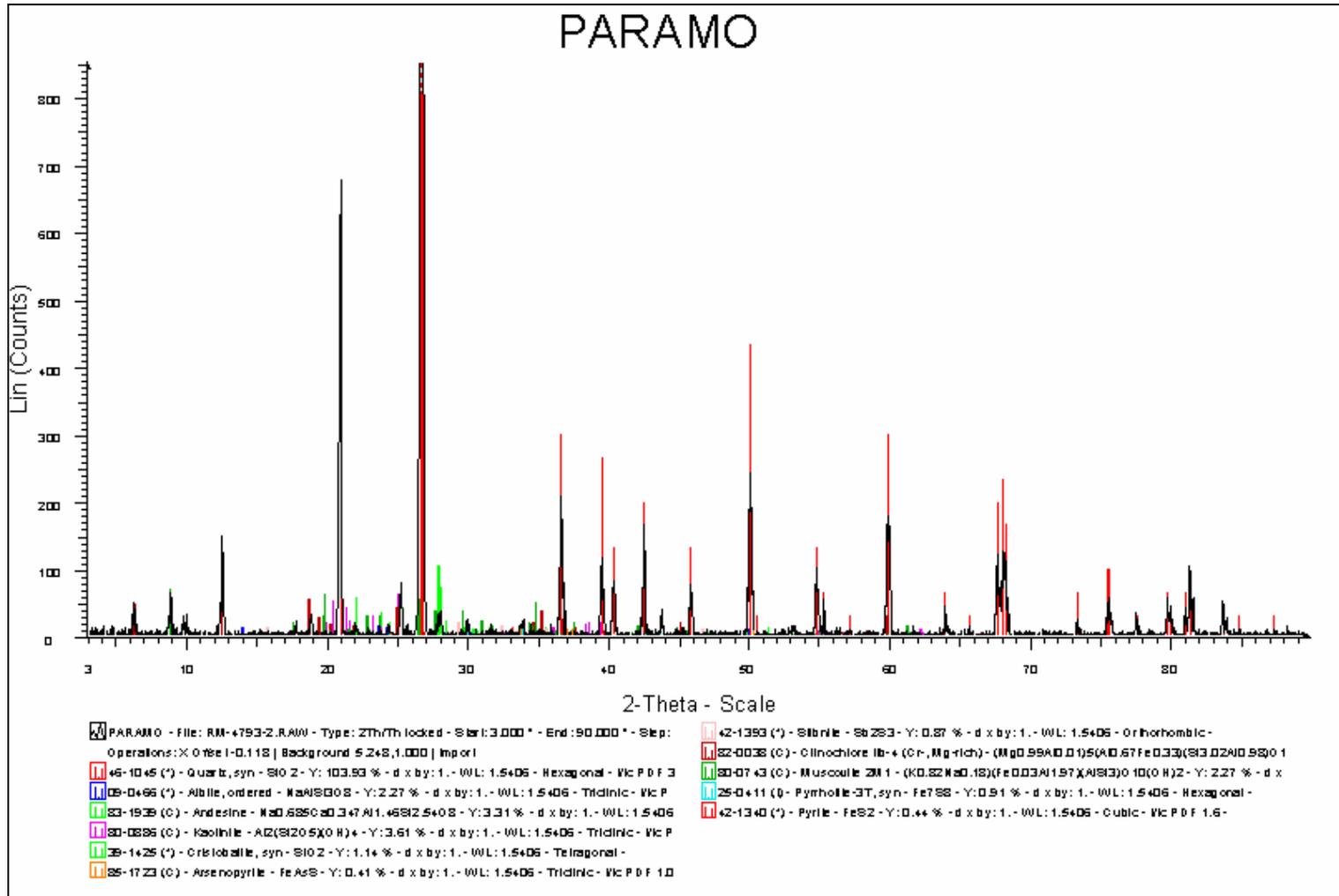
Calculo de porcentajes de oro en fracción por análisis granulométrico y ensayo al fuego, mineral Playa Dorada

Tamiz N°	Abertura, $\mu\text{m}$	Peso	% en peso	Au (g/TM)	% Peso * ley	Rendimiento (%)	% Au (g/TM)
80	180	16,8	0,84	10,67	9,01	0,43	7,66
100	147	15,6	0,78	18,28	14,33	0,68	13,12
150	104	48	2,41	37,73	91,01	4,34	27,09
200	74	115,2	5,79	27,80	160,93	7,67	19,96
270	53	241,8	12,15	25,41	308,75	14,71	18,24
<270	<53	1552,6	78,02	19,41	1514,37	72,17	13,93
Alimentación		1990,0					
Totales			100,0	139,30	2098,40	100,0	100,0
Ley media calculada					20,98		

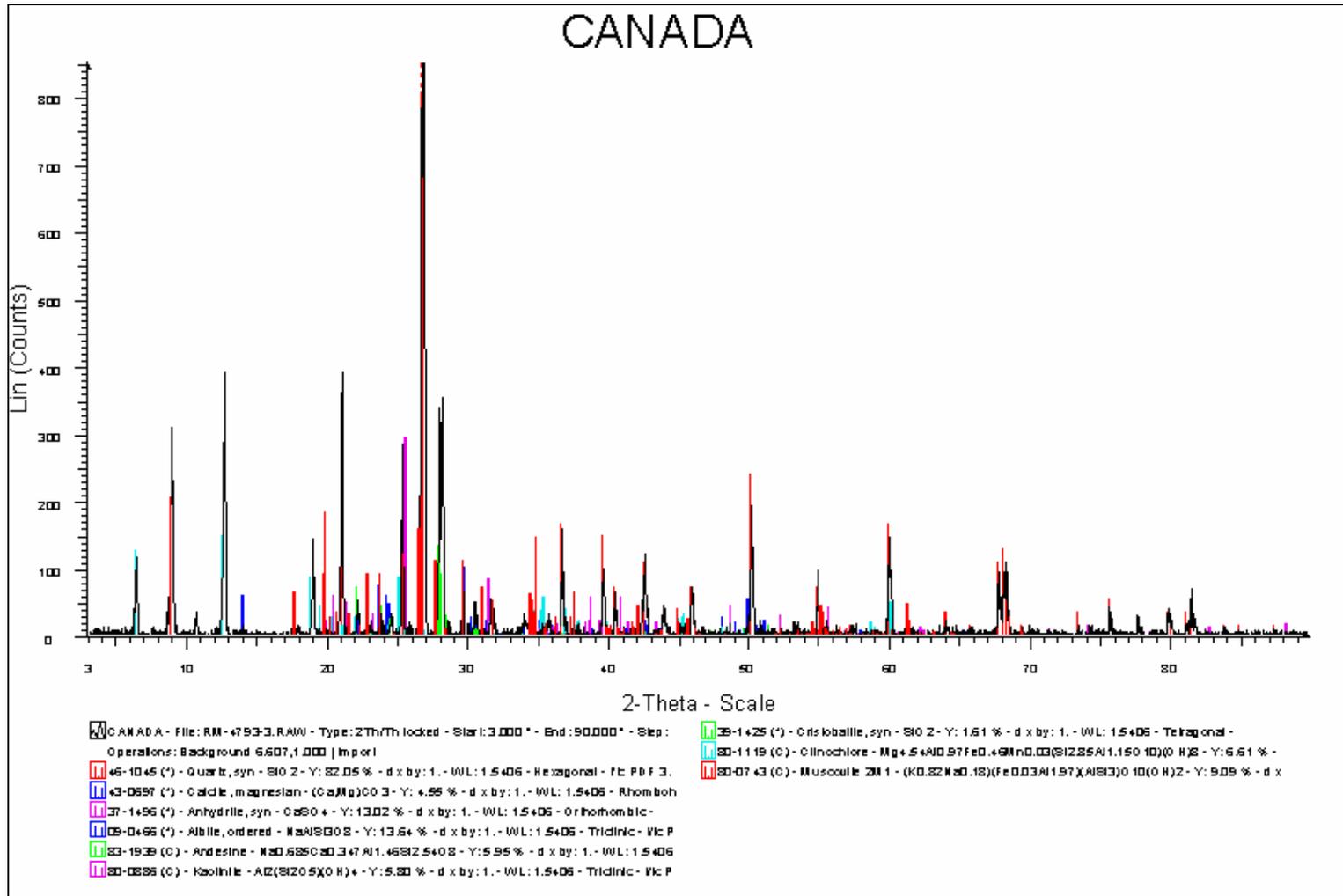
Anexo C. Difracción de rayos X, análisis de cabeza, mineral El Paraíso.



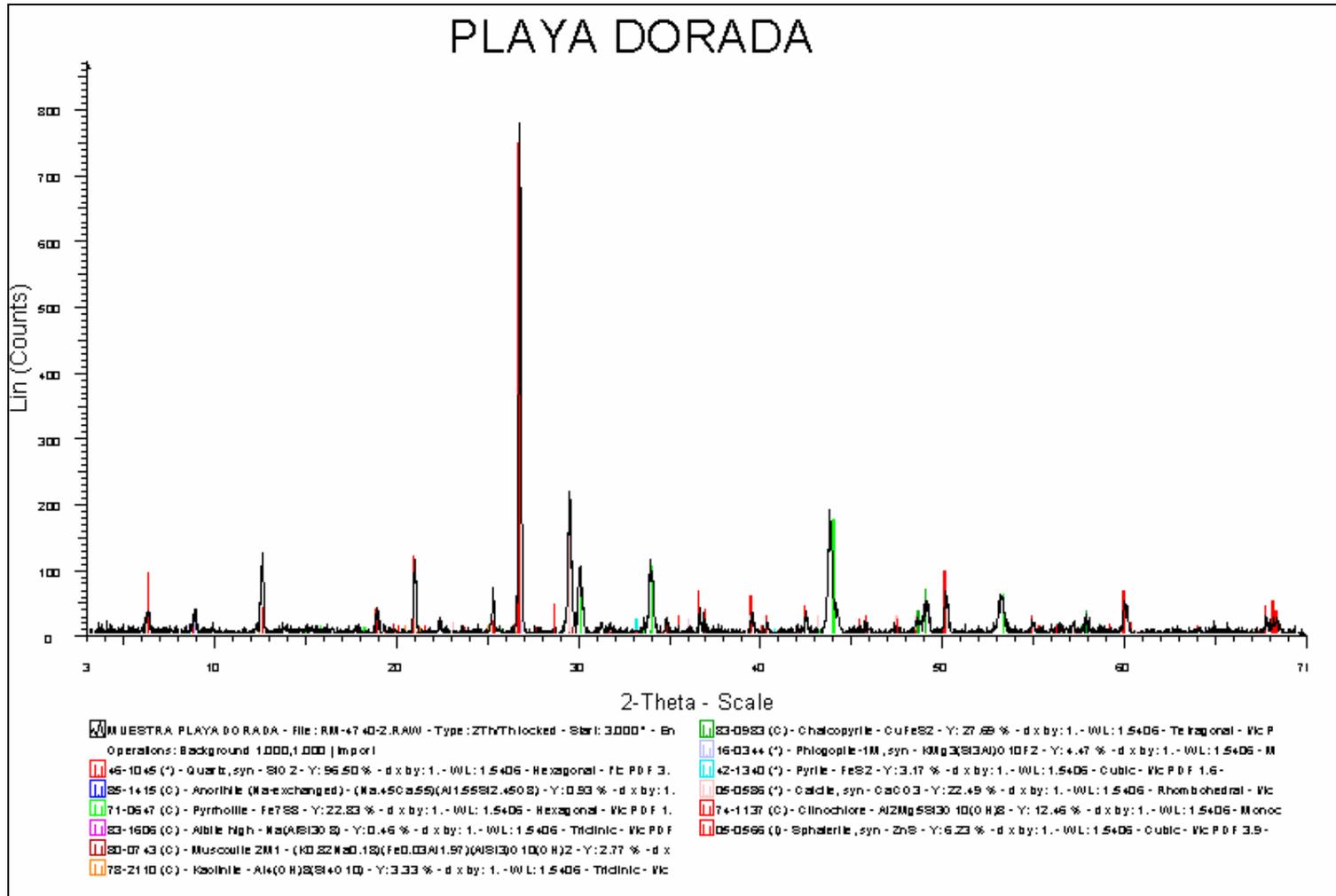
Difracción de rayos X, análisis de cabeza, mineral El Páramo.



Difracción de rayos X, análisis de cabeza, mineral El Canadá.



Difracción de rayos X, análisis de cabeza, mineral Playa Dorada.

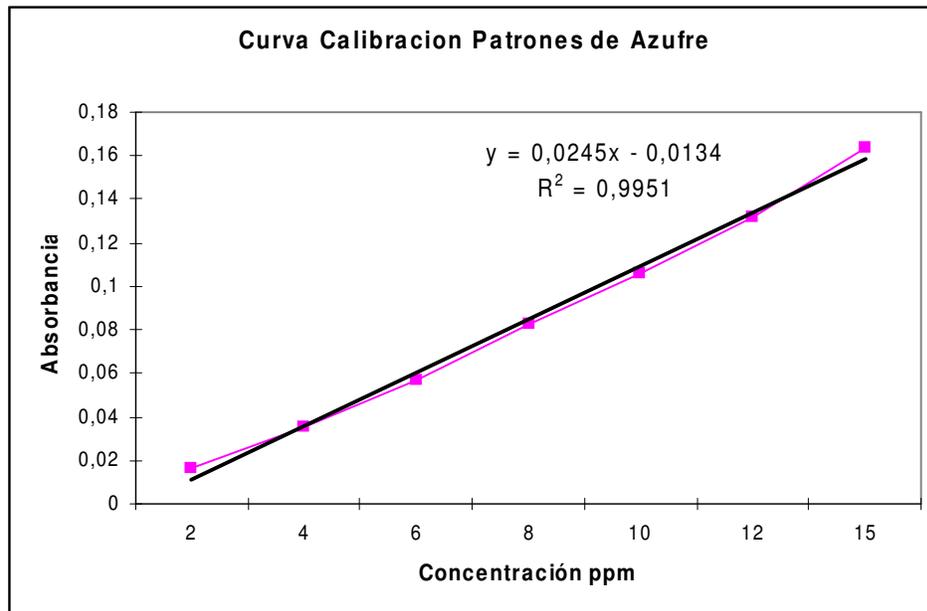


Anexo D. Curvas de calibración para análisis de sulfatos y oro, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada.

Datos curva de calibración para determinación de azufre como sulfatos por Espectrofotometría UV Vis

Estándar	[ppm]	Absorbancia
1	2	0,016
2	4	0,035
3	6	0,057
4	8	0,083
5	10	0,106
6	12	0,132
7	15	0,164

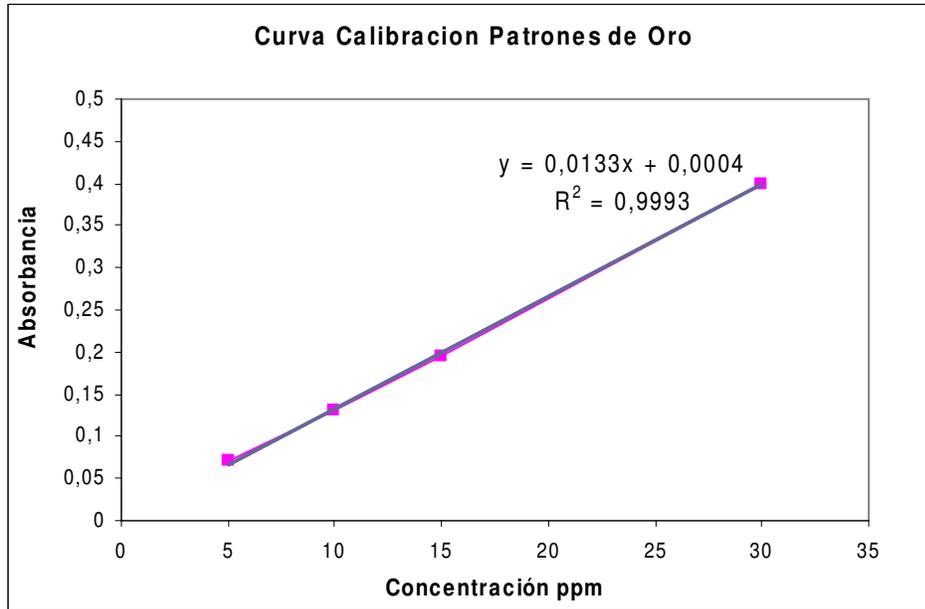
Curva de calibración para determinación de azufre como sulfatos



Datos curva de calibración para determinación de oro por Espectrofotometría de Absorción Atómica

Estándar	[ppm]	Absorbancia
1	5	0,071
2	10	0,13
3	15	0,196
4	30	0,4

Curva de calibración para determinación de oro



Anexo E. Condiciones de operación, flotación estándar y de afinamiento, mineral Playa Dorada.

Condiciones de operación, flotación estándar, mineral Playa Dorada

Operaciones	t (min)	% Sólidos	pH	Reactivos Utilizados(g/TM)						Reactivos
Molienda	30	62,5	6,5	CaO	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	KEX	A208	AP	CaO: Oxido de Calcio
Flotación										Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : Silicato de Sodio
Acondicionamiento	5	33,33	10,2	700						KEX: Examilxantato de potasio
CA	4				20	200	50		10	A208: Aerofloat 208
CB	2						50		10	AP: Aceite de Pino

Condiciones de operación, flotación de afinamiento, mineral Playa Dorada

Operaciones	t (min)	% Sólidos	pH	Reactivos Utilizados(g/TM)						Reactivos
Molienda	30	62,5	6,8	CaO	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	KAX	A208	AP	CaO: Oxido de Calcio
Flotación										Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : Silicato de Sodio
Acondicionamiento	5	33,33								KEX: Amilxantato de potasio
CA	5		10		200		200	150	50	A208: Aerofloat
Afinamiento 1	1		11	900						AP: Aceite de Pino
Afinamiento 2	1		10							

Anexo F. Cianuraciones estándar por agitación, minerales El Paraíso, El Páramo, El Canadá y Playa Dorada.

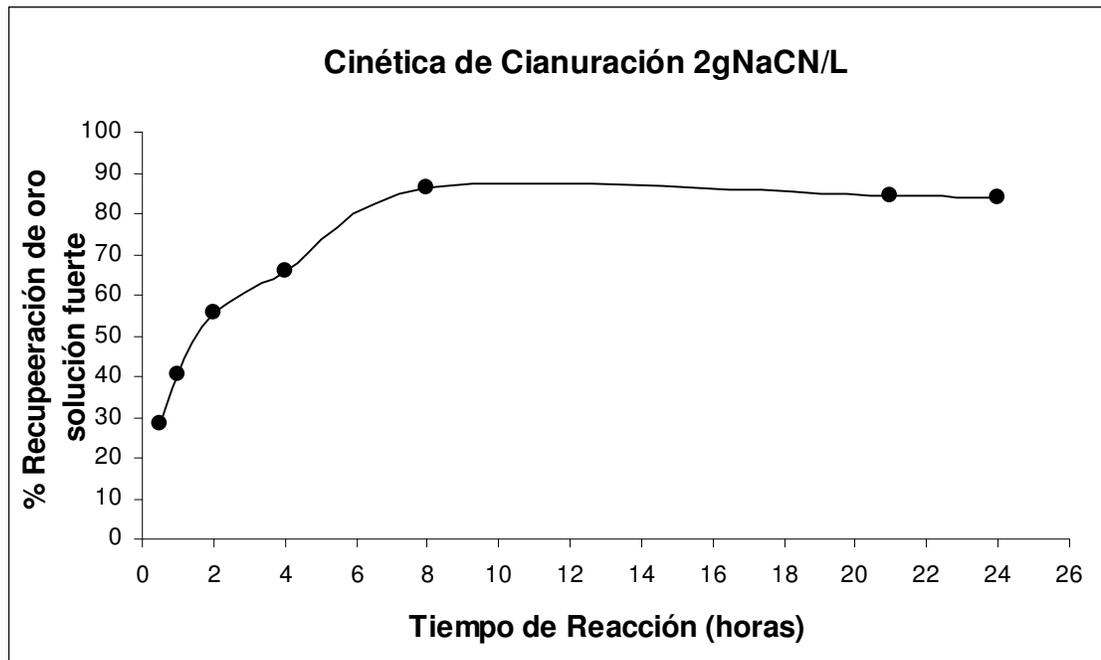
Cianuración estándar, mineral El Paraíso

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración					
Molienda			Cianuración		
Tiempo:	30min		Tiempo	24 horas	
Peso material:	1Kg.		Peso del mineral	1Kg	
% Sólidos:	62,50%		% Sólidos	33,33%	
Volumen de agua	0,6L		Volumen de agua	2L	
			pH inicial:	7,77	
			pH trabajo:	10,31	
			Adición de cal:	1.11g	
			Tiempo pre-aireación:	0,5 horas	
			Conc cianuro libre:	2g/L	

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,540	4,00	1,11	10,31
0,5	0,85	0,050	2,30	0,00	11,16
1	1,35	0,075	1,30	0,00	11,26
2	1,25	0,300	1,50	0,00	11,47
4	1,05	0,300	1,90	0,00	11,48
8	1,00	0,100	2,00	0,00	11,45
21	0,30	0,100	3,40	1,08	9,40
24	0,80	0,150	0,00	0,00	10,38
Total añadido (g)			16,40	2,18	
Consumo (Kg/TM)			16,40	2,18	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,80	21,60	38,88	86,80
Solución lavado (L.)	0,95	6,12	5,81	13,00
Relave (Kg)	1,00	0,10	0,10	0,20
Alimentación recalculada	44,79	21,60	44,79	86,80
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 99,80%				
Au en solución: 44,69mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	6,32	12,64	28,22
1	9,12	18,24	40,72
2	12,44	24,88	55,54
4	14,71	29,42	65,68
8	19,31	38,62	86,22
21	18,85	37,70	84,16
24	18,80	37,60	83,94



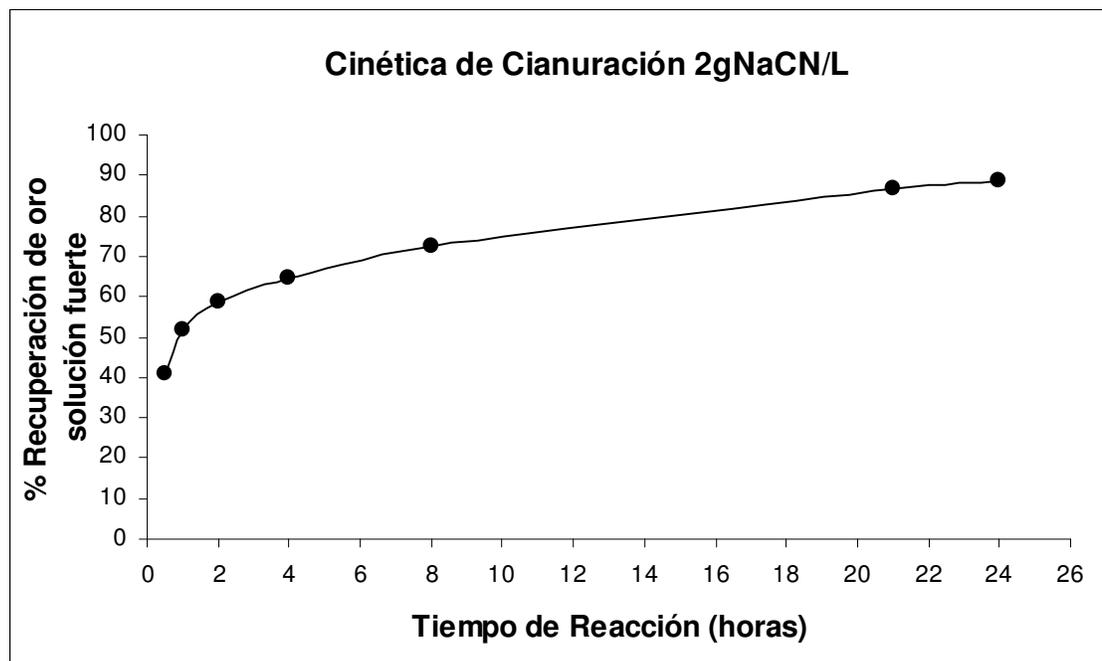
Cianuración estándar, mineral El Páramo

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	Volumen de agua	2L
		pH inicial:	8,2
		pH trabajo:	10,90
		Adición de cal:	3,50g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	1,75	4,00	3,50	10,90
0,5	1,51	1,70	0,98	0,00	11,00
1	1,85	1,70	0,60	0,00	11,12
2	1,79	1,60	0,42	0,00	11,05
4	1,68	1,60	0,64	0,00	10,96
8	1,91	1,60	0,32	0,00	10,90
21	1,85	1,50	0,30	0,00	10,32
24	0,00	1,50	0,00	0,00	11,25
Total añadido (g)			7,26	3,50	
Consumo (Kg/TM)			7,26	3,50	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,95	2,23	4,35	96,80
Solución lavado (L.)	0,95	0,12	0,11	2,50
Relave (Kg)	1,00	0,03	0,03	0,70
Alimentación recalculada	4,49		4,49	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 99,30%				
Au en solución: 4,46 mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	0,92	1,84	41,0
1	1,16	2,32	51,60
2	1,32	2,64	58,81
4	1,45	2,90	64,60
8	1,63	3,26	72,61
21	1,95	3,90	86,80
24	1,99	3,98	88,62



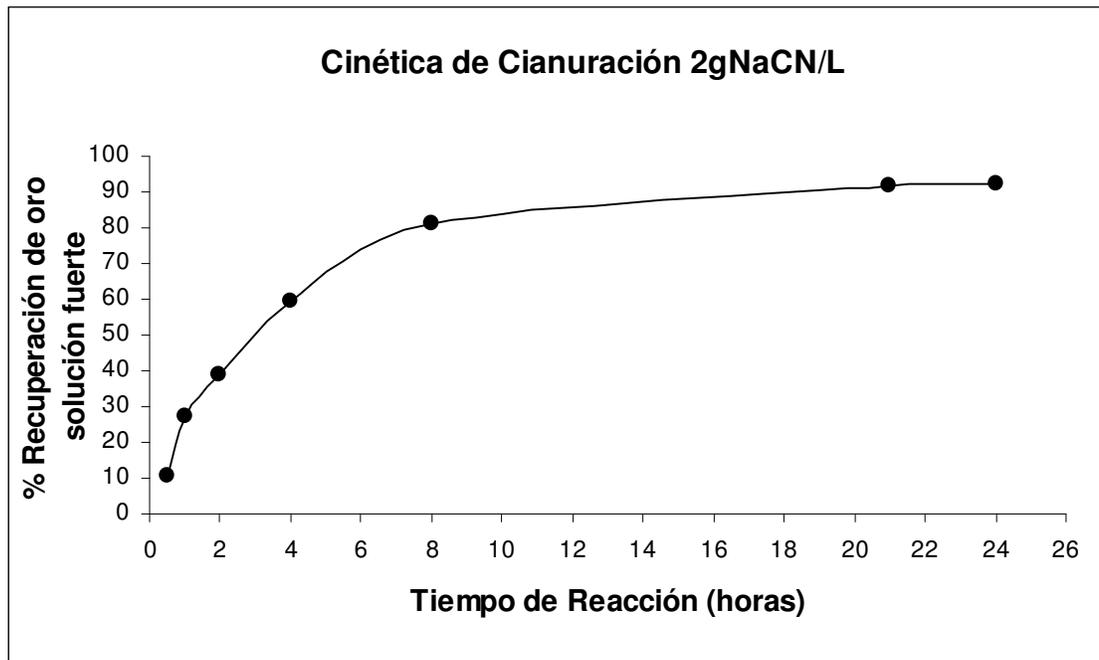
Cianuración estándar, mineral El Canadá

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	Volumen de agua	2L
		pH inicial:	6,96
		pH trabajo:	10,50
		Adición de cal:	2,10g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre::	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,540	4,00	2,10	10,50
0,5	1,85	0,050	0,30	0,00	10,62
1	1,69	0,075	0,62	0,00	10,97
2	1,97	0,300	0,06	0,00	10,97
4	1,97	0,300	0,06	0,00	11,04
8	1,99	0,100	0,02	0,00	11,05
21	1,90	0,100	0,20	0,00	11,46
24	0,00	0,150	0,00	0,00	11,37
Total añadido (g)			5,26	2,10	
Consumo (Kg/TM)			5,26	2,10	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,95	8,22	16,03	93,90
Solución lavado (L.)	0,98	0,83	0,81	4,80
Relave (Kg)	1,00	0,22	0,22	1,30
Alimentación recalculada	17,06		17,06	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 98,70 %				
Au en solución: 16,84mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	0,88	1,76	10,32
1	2,33	4,66	27,31
2	3,33	6,66	39,00
4	5,06	10,12	59,31
8	6,91	13,81	80,90
21	7,80	15,60	91,40
24	7,85	15,70	92,03



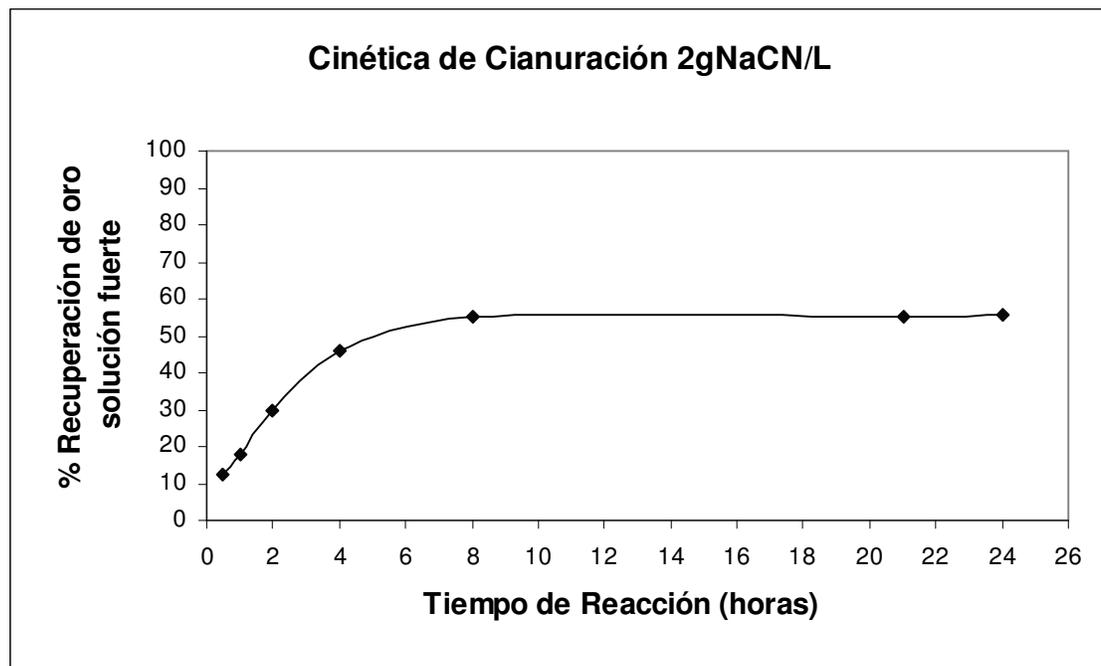
Cianuración estándar, mineral Playa Dorada. Replica 1

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	7,6
		pH trabajo:	10,50
		Adición de cal:	1,25g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,50	4,00	1,25	10,50
0,5	1,09	0,05	1,82	0,00	11,18
1	1,01	0,90	1,98	0,00	11,23
2	1,22	0,36	1,56	0,00	11,42
4	0,90	0,35	2,20	0,00	11,32
8	0,99	0,13	2,02	0,00	11,41
21	0,25	0,14	3,50	2,20	9,60
24	0,72	0,15	0,00	0,00	11,01
Total añadido (g)			17,08	3,45	
Consumo (Kg/TM)			17,08	3,45	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,69	6,55	11,07	56,60
Solución lavado (L.)	0,99	1,15	1,14	5,80
Relave (Kg)	1,00	7,36	7,36	37,60
Alimentación recalculada	19,57		19,57	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 62,40%				
Au en solución: 12,21mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	1,21	2,39	12,20
1	1,78	3,56	18,01
2	2,93	5,86	29,70
4	4,53	9,06	45,91
8	5,42	10,84	54,93
21	5,46	10,92	55,39
24	5,50	11,01	55,80



Anexo G. Cianuración estándar por agitación, empleando tratamientos oxidativos y cianuración en molienda, mineral Playa Dorada.

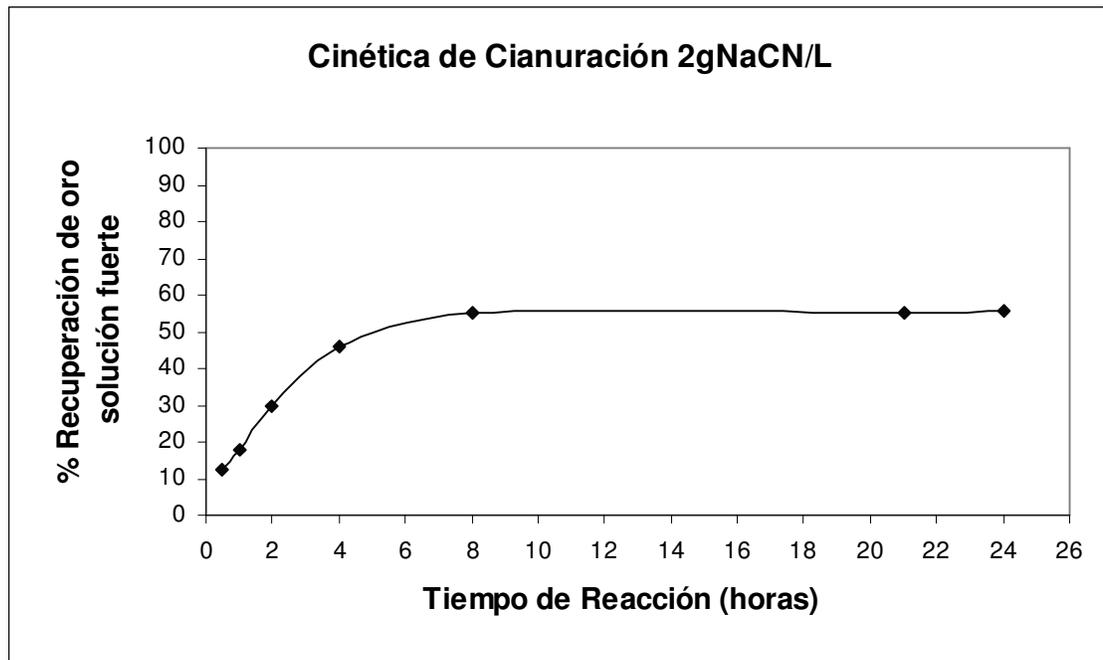
Cianuración estándar, mineral Playa Dorada. Replica 2

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	7,4
		pH trabajo:	10,31
		Adición de cal:	1,11g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,540	4,00	1,11	10,31
0,5	0,85	0,050	2,30	0,00	11,16
1	1,35	0,075	1,30	0,00	11,26
2	1,25	0,300	1,50	0,00	11,47
4	1,05	0,300	1,90	0,00	11,48
8	1,00	0,100	2,00	0,00	11,45
21	0,30	0,100	3,40	1,08	9,40
24	0,80	0,150	0,00	0,00	10,38
Total añadido (g)			16,40	2,18	
Consumo (Kg/TM)			16,40	2,18	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,69	6,70	11,32	57,40
Solución lavado (L.)	0,99	1,09	1,08	5,50
Relave (Kg)	1,00	7,33	7,33	37,10
Alimentación recalculada	19,74		19,74	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 62,90%				
Au en solución: 12,40mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	1,12	2,24	11,39
1	1,70	3,41	17,20
2	2,92	5,84	29,59
4	4,56	9,12	46,20
8	5,48	10,96	55,60
21	5,56	11,12	56,41
24	5,59	11,18	56,71



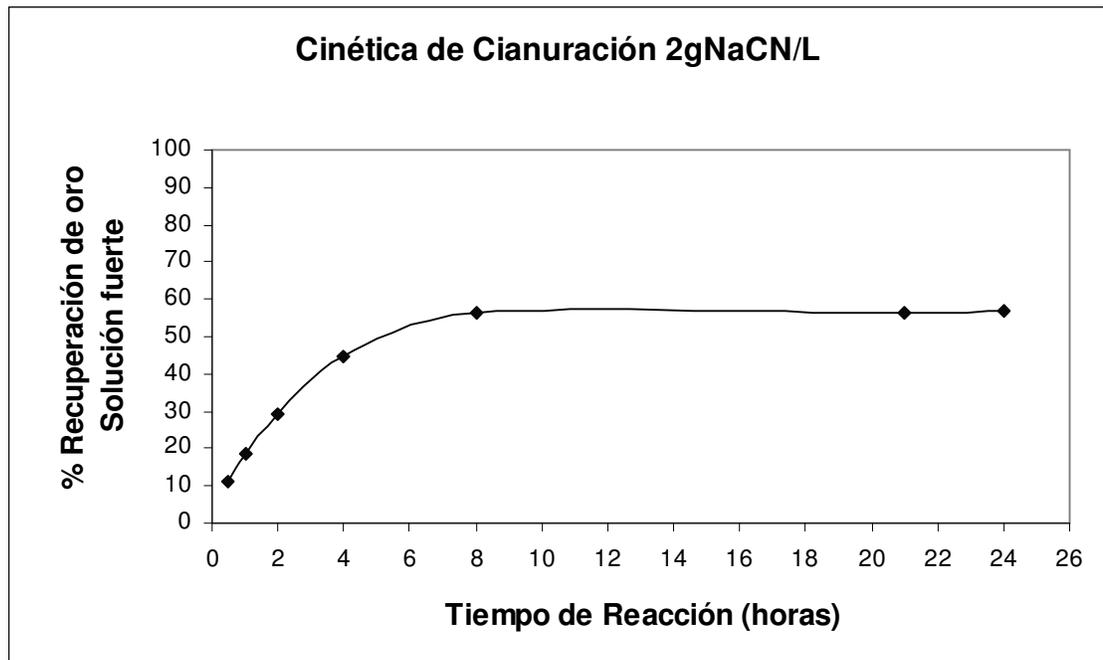
Cianuración estándar, mineral Playa Dorada. Replica 3

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	7,82
		pH trabajo:	10,50
		Adición de cal:	1,22g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,520	4,00	1,22	10,50
0,5	1,01	0,045	1,98	0,00	11,22
1	1,22	0,080	1,56	0,00	11,26
2	1,32	0,330	1,36	0,00	11,47
4	0,90	0,300	2,20	0,00	11,35
8	1,01	0,110	1,98	0,00	11,41
21	0,23	0,130	3,54	2,01	9,65
24	0,76	0,140	0,00	0,00	10,92
Total añadido (g)			16,62	3,23	
Consumo (Kg/TM)			16,62	3,23	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,69	6,72	11,36	57,80
Solución lavado (L.)	0,98	1,10	1,08	5,50
Relave (Kg)	1,00	7,22	7,22	36,70
Alimentación recalculada	19,66		19,66	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 63,30%				
Au en solución: 12,44mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	1,10	2,20	11,21
1	1,82	3,64	18,50
2	2,86	5,72	29,00
4	4,42	8,84	44,81
8	5,54	11,08	56,20
21	5,57	11,14	56,51
24	5,62	11,24	57,00



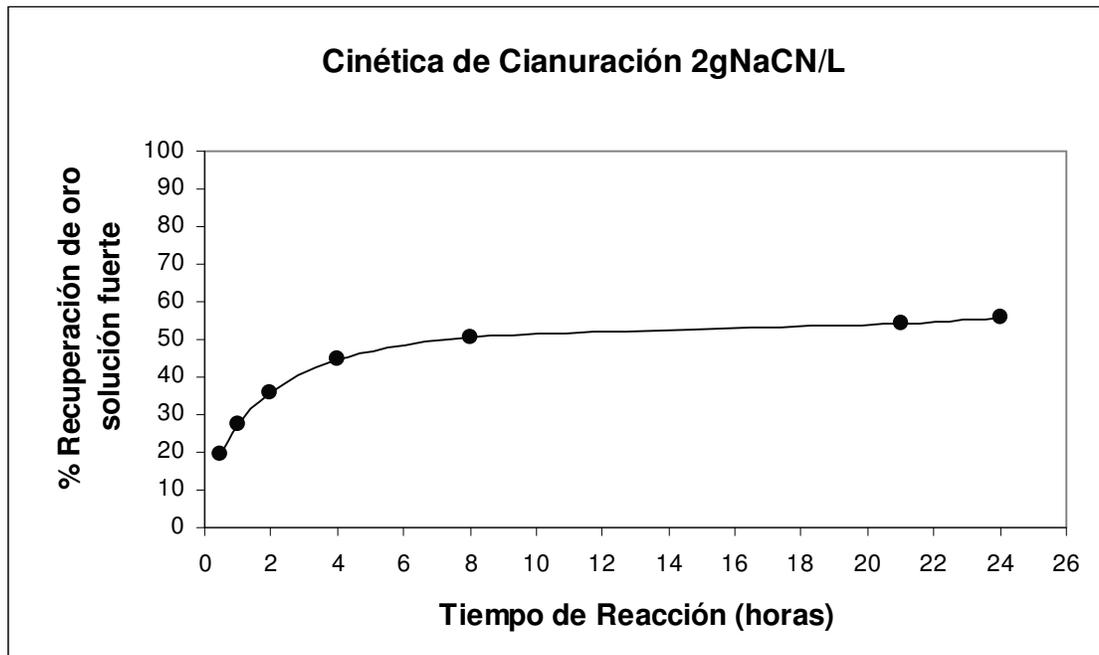
Cianuración estándar con cianuración en molienda, mineral Playa Dorada. Replica 1

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	7,5
		pH trabajo:	10,48
		Adición de cal:	3,14g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	1,570	1,20	3,14	10,48
0,5	0,05	0,050	3,90	0,65	9,50
1	1,35	0,050	1,30	0,00	10,91
2	1,30	0,050	1,40	0,00	11,13
4	1,15	0,050	1,70	0,00	11,38
8	1,50	0,075	1,00	0,00	11,37
21	0,15	0,050	3,70	1,17	9,72
24	1,00	0,150	0,00	0,00	10,68
Total añadido (g)			14,20	4,96	
Consumo (Kg/TM)			14,20	4,96	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,80	6,36	11,45	59,70
Solución lavado (L.)	1,00	1,06	1,06	5,50
Relave (Kg)	1,00	6,68	6,68	34,80
Alimentación recalculada	19,19		19,19	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 65,20%				
Au en solución: 12,51mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	1,86	3,72	19,39
1	2,64	5,28	27,51
2	3,43	6,86	35,79
4	4,30	8,61	44,80
8	4,86	9,72	50,71
21	5,22	10,44	54,40
24	5,36	10,72	55,91



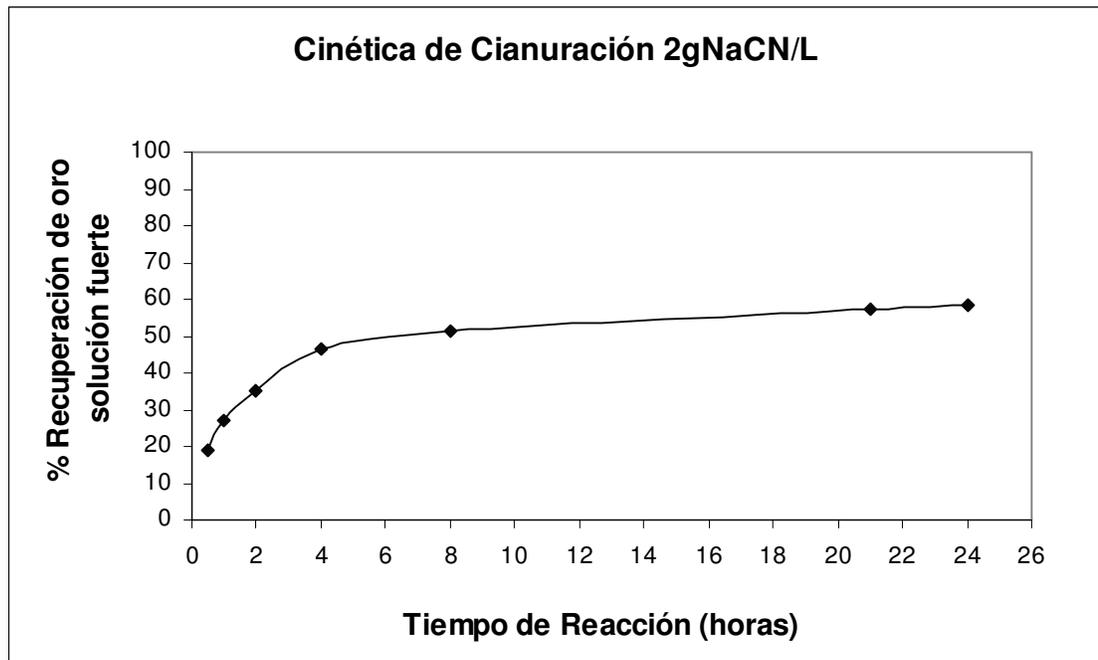
Cianuración estándar con cianuración en molienda, mineral Playa Dorada. Replica 2

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	7,36
		pH trabajo:	10,43
		Adición de cal:	3,12g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	1,560	1,20	3,12	10,43
0,5	0,07	0,052	3,86	0,62	9,42
1	1,37	0,050	1,30	0,00	10,93
2	1,33	0,050	1,34	0,00	11,16
4	1,20	0,050	1,60	0,00	11,34
8	1,51	0,076	0,98	0,00	11,36
21	0,16	0,050	3,68	1,15	9,73
24	0,98	0,150	0,00	0,00	10,7
Total añadido (g)			13,96	4,89	
Consumo (Kg/TM)			13,96	4,89	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,77	6,53	11,56	60,11
Solución lavado (L.)	1,00	0,96	0,96	4,99
Relave (Kg)	1,00	6,71	6,71	34,90
Alimentación recalculada	19,23		19,23	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 65,10%				
Au en solución: 12,52mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	1,80	3,61	18,72
1	2,62	5,24	27,25
2	3,38	6,76	35,16
4	4,46	8,92	46,39
8	4,96	9,92	51,59
21	5,51	11,02	57,31
24	5,63	11,26	58,56



Cianuración estándar con cianuración en molienda, mineral Playa Dorada. Replica 3

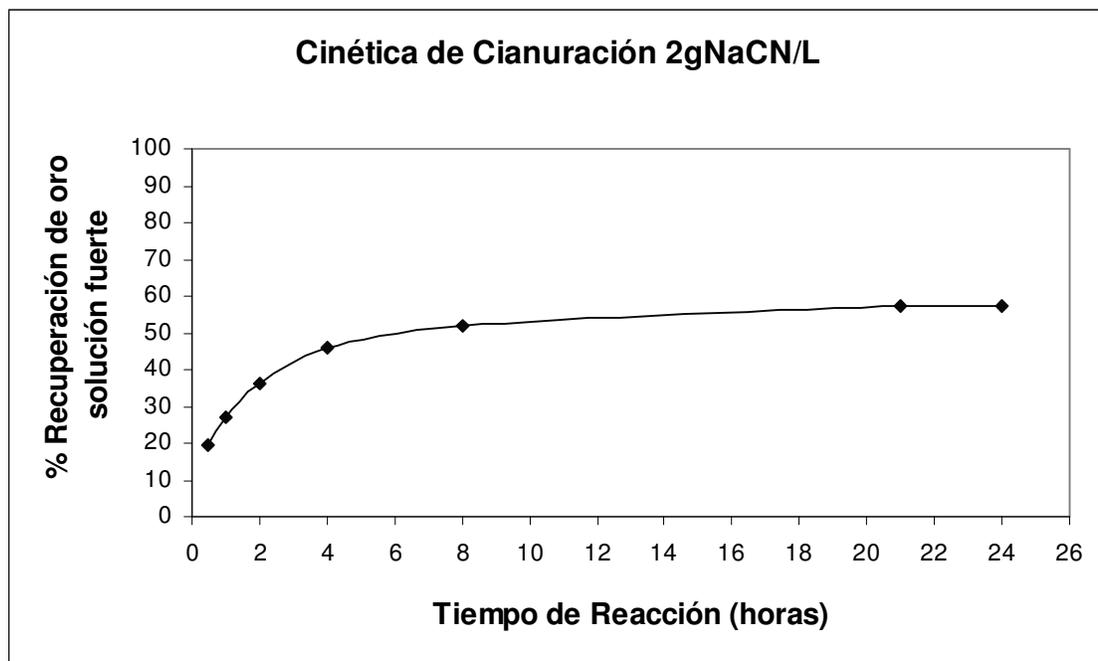
Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	7,28
		pH trabajo:	10,48
		Adición de cal:	3,15g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	1,580	1,20	3,15	10,48
0,5	0,05	0,052	3,90	0,62	9,43
1	1,38	0,052	1,24	0,00	10,95
2	1,35	0,047	1,30	0,00	11,12
4	1,18	0,050	1,64	0,00	11,35
8	1,50	0,076	1,00	0,00	11,38
21	0,18	0,052	3,64	1,15	9,75
24	1,00	0,153	0,00	0,00	10,65
Total añadido (g)			13,92	4,92	
Consumo (Kg/TM)			13,92	4,92	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,80	6,33	11,39	59,30
Solución lavado (L.)	1,00	1,01	1,01	5,26
Relave (Kg)	1,00	6,81	6,81	35,44
Alimentación recalculada	19,21		19,21	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 64,56%				
Au en solución: 12,40mg				

Cinética del proceso de cianuración

Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	1,88	3,76	19,57
1	2,58	5,16	26,86
2	3,46	6,92	36,02
4	4,40	8,80	45,80
8	5,01	10,02	52,15
21	5,48	10,96	57,04
24	5,52	11,04	57,46



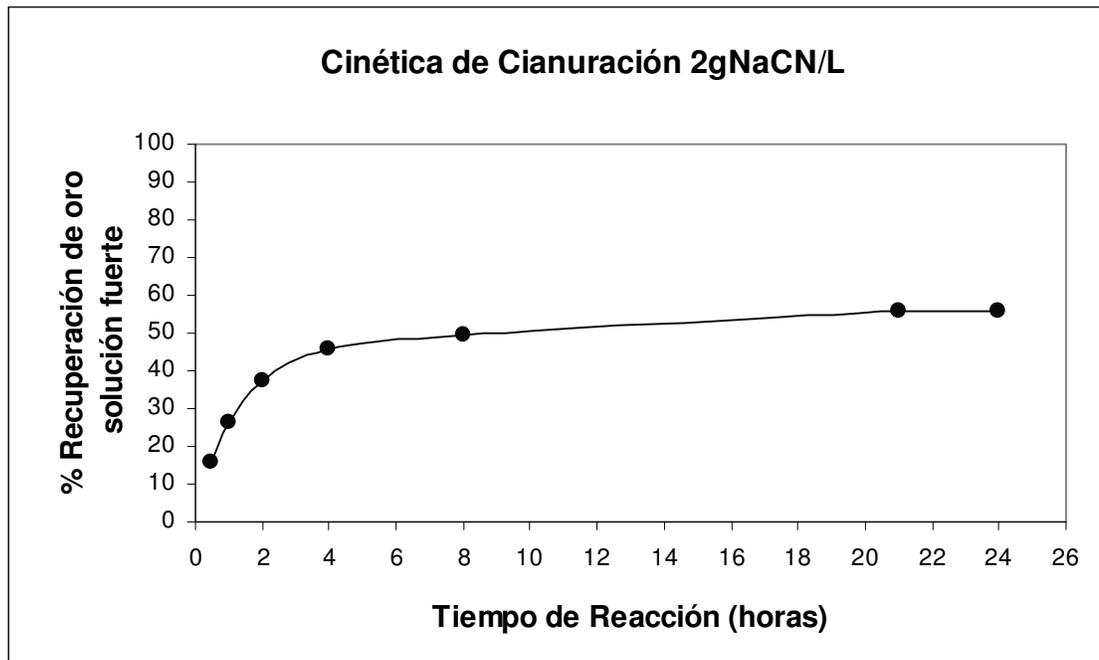
Cianuración estándar con inyección de aire, mineral Playa Dorada. Replica 1

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	7,49
		pH trabajo:	10,40
		Adición de cal:	4,19g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Inyección de aire	24 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	2,09	4,00	4,19	10,40
0,5	0,70	0,15	2,60	0,00	10,54
1	1,50	0,15	1,00	0,00	10,57
2	1,25	0,10	1,50	0,00	10,87
4	0,65	0,15	2,70	0,00	10,56
8	0,75	0,10	2,50	1,05	10,24
21	0,35	0,10	3,30	5,12	9,00
24	1,15	0,10	0,00	0,00	10,50
Total añadido (g)			17,60	10,36	
Consumo (Kg/TM)			17,60	10,36	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,70	6,38	10,85	58,60
Solución lavado (L.)	1,00	1,02	1,02	5,50
Relave (Kg)	1,00	6,66	6,64	35,90
Alimentación recalculada	18,51		18,51	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 64,10%				
Au en solución: 11,87mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	1,46	2,92	15,70
1	2,44	4,88	26,31
2	3,44	6,88	37,13
4	4,22	8,44	45,52
8	4,58	9,16	49,33
21	5,14	10,28	55,40
24	5,16	10,32	55,60



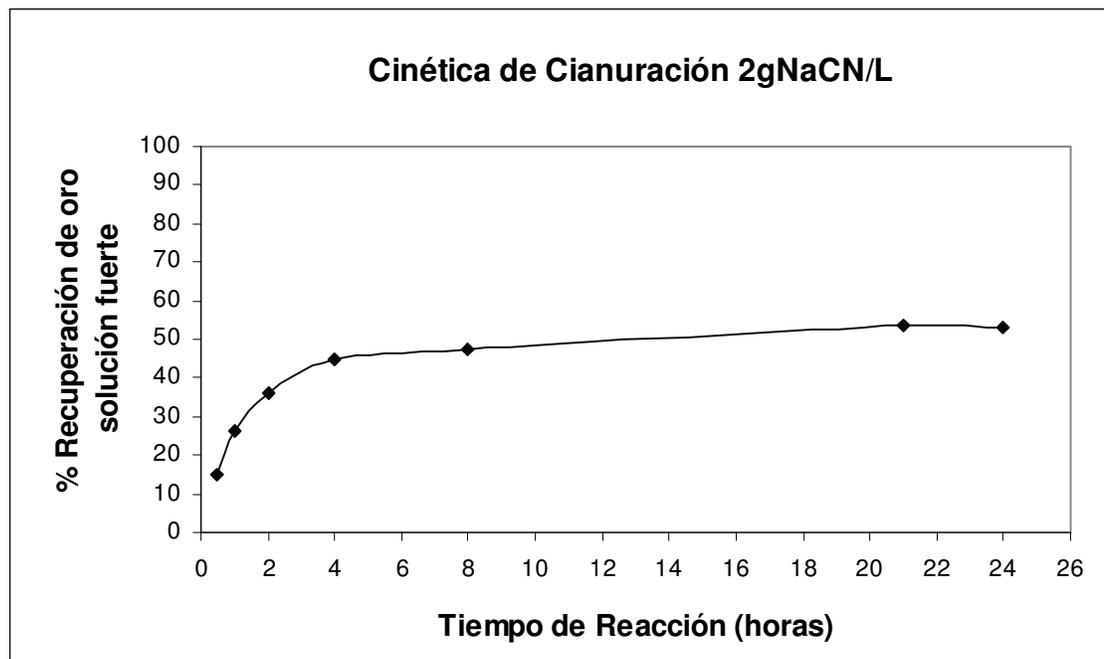
Cianuración estándar con inyección de aire, mineral Playa Dorada. Replica 2

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	7,33
		pH trabajo:	10,41
		Adición de cal:	4,20g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Inyección de aire	24 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	2,100	4,00	4,20	10,41
0,5	0,68	0,153	2,64	0,00	10,56
1	1,52	0,152	0,96	0,00	10,57
2	1,24	0,153	1,52	0,00	10,92
4	0,64	0,151	2,72	0,00	10,52
8	0,76	0,120	2,48	1,07	10,26
21	0,33	0,120	3,34	5,10	9,13
24	1,16	0,110	0,00	0,00	10,53
Total añadido (g)			17,66	10,37	
Consumo (Kg/TM)			17,66	10,37	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,80	6,19	11,14	59,56
Solución lavado (L.)	1,00	0,95	0,95	5,08
Relave (Kg)	0,98	6,75	6,62	35,36
Alimentación recalculada	19,09		18,71	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 64,64%				
Au en solución: 12,09mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	1,42	2,84	14,88
1	2,50	5,01	26,19
2	3,46	6,92	36,25
4	4,30	8,59	45,05
8	4,54	9,08	47,57
21	5,11	10,20	53,43
24	5,08	10,16	53,22



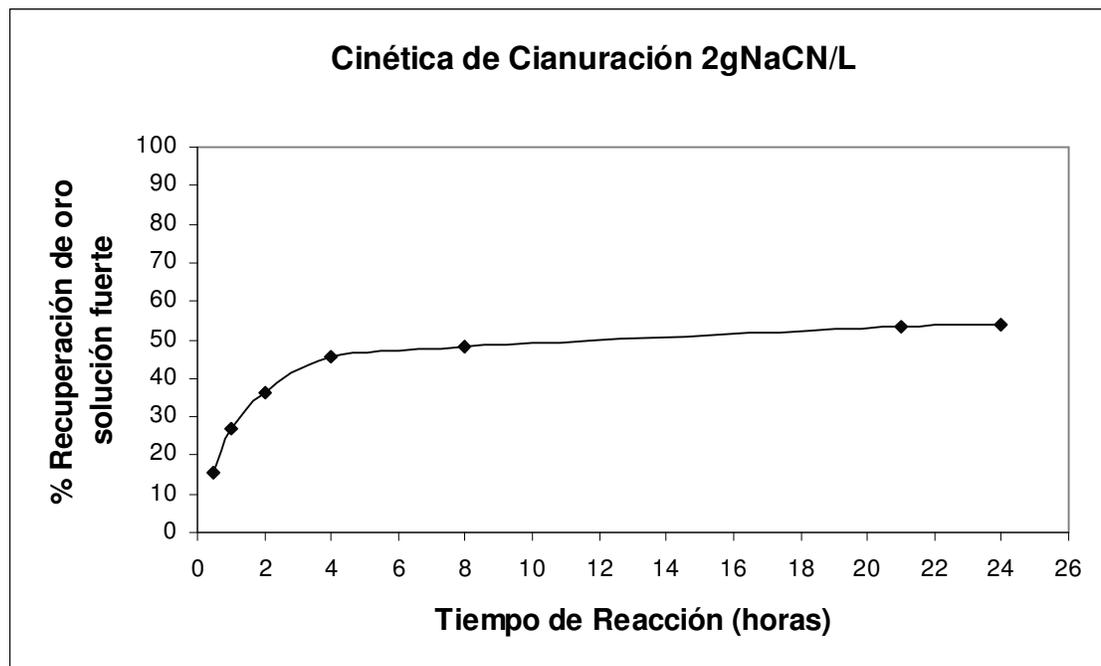
Cianuración estándar con inyección de aire, mineral Playa Dorada. Replica 3

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	7,5
		pH trabajo:	10,42
		Adición de cal:	4,10g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Inyección de aire	24 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	2,050	4,00	4,10	10,42
0,5	0,69	0,050	2,62	0,00	10,50
1	1,54	0,075	1,30	0,00	10,60
2	1,28	0,300	1,44	0,00	11,00
4	0,68	0,300	2,64	0,00	10,58
8	0,77	0,100	2,46	1,10	10,27
21	0,35	0,100	3,30	5,00	9,050
24	1,14	0,150	0,00	0,00	10,50
Total añadido (g)			17,76	10,20	
Consumo (Kg/TM)			17,76	10,20	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,70	6,52	11,08	58,48
Solución lavado (L.)	1,00	1,08	1,08	5,70
Relave (Kg)	1,00	6,79	6,79	35,82
Alimentación recalculada	18,95		18,95	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 64,18%				
Au en solución: 12,16mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	1,46	2,92	15,41
1	2,54	5,08	26,80
2	3,42	6,84	36,09
4	4,30	8,61	45,37
8	4,58	9,16	48,33
21	5,08	10,16	53,60
24	5,10	10,21	53,81



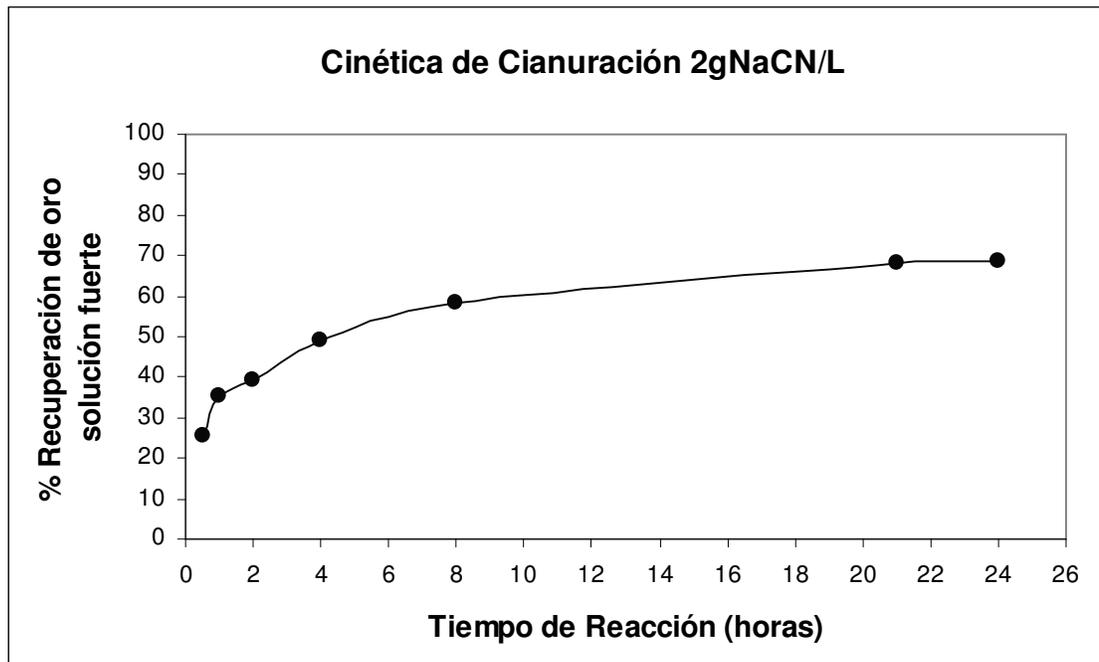
Cianuración estándar con adición de peróxido de Sodio Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, mineral Playa Dorada.  
Replica 1

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración					
Molienda			Cianuración		
Tiempo:	30min		Tiempo	24 horas	
Peso material:	1Kg.		Peso del mineral	1 Kg	
% Sólidos:	62,50%		% Sólidos	33,33%	
Volumen de agua	0,6L		pH inicial:	7,67	
			pH trabajo:	10,53	
			Adición de cal:	0,00g	
			Tiempo pre-aireación:	0,5 horas	
			Conc cianuro libre:	2g/L	
			Conc peróxido de Sodio	5g/Kg	

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,25	4,00	0,00	10,53
0,5	1,25	0,35	1,50	0,00	11,10
1	1,50	0,30	1,00	0,00	11,20
2	1,55	0,30	0,90	0,00	11,46
4	1,85	0,30	0,30	0,00	11,56
8	0,75	0,20	2,50	0,00	11,33
21	0,25	0,10	3,50	8,07	9,36
24	1,70	0,15	0,00	0,00	10,76
Total añadido (g)			13,70	8,07	
Consumo (Kg/TM)			13,70	8,07	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,75	7,92	13,86	69,60
Solución lavado (L.)	0,98	0,85	0,83	4,20
Relave (Kg)	1,00	5,22	5,22	26,20
Alimentación recalculada	19,91		19,91	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 73,80%				
Au en solución: 14,69mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	2,52	5,04	25,32
1	3,52	7,04	35,40
2	3,92	7,84	39,42
4	4,90	9,80	49,21
8	5,82	11,64	58,50
21	6,78	13,56	68,10
24	6,82	13,64	68,50



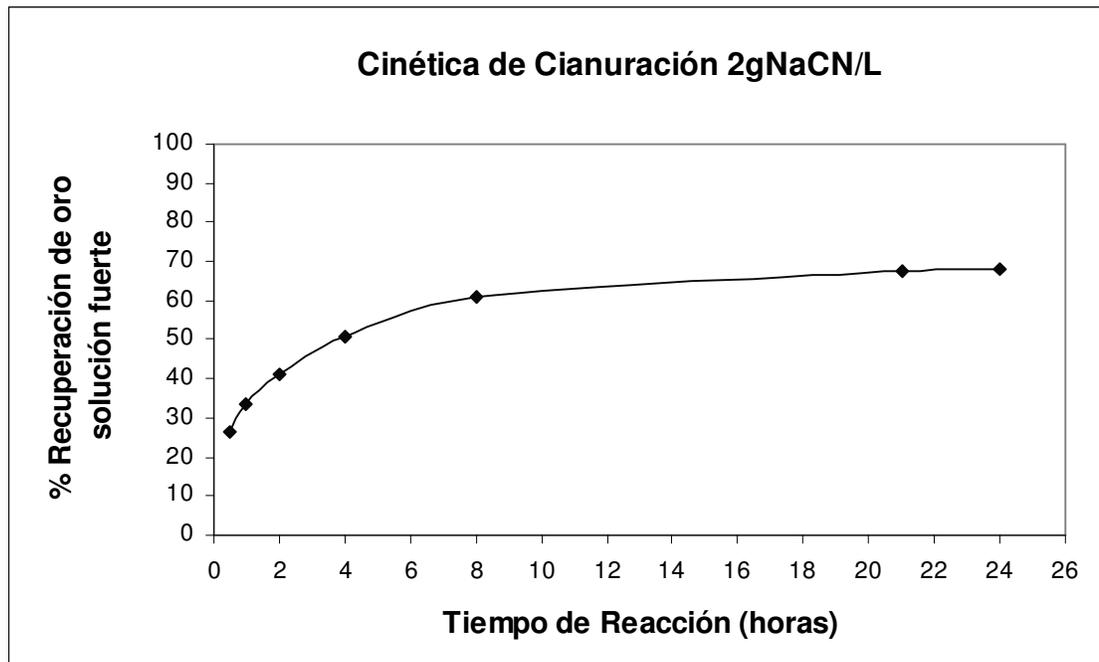
Cianuración estándar con adición de peróxido de Sodio Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, mineral Playa Dorada.  
Replica 2

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración					
Molienda			Cianuración		
Tiempo:	30min		Tiempo	24 horas	
Peso material:	1Kg.		Peso del mineral	1 Kg	
% Sólidos:	62,50%		% Sólidos	33,33%	
Volumen de agua	0,6L		pH inicial:	7,67	
			pH trabajo:	10,55	
			Adición de cal:	0,00g	
			Tiempo pre-aireación:	0,5 horas	
			Conc cianuro libre:	2g/L	
			Conc peróxido de Sodio	5g/Kg	

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,25	4,00	0,00	10,55
0,5	1,26	0,35	1,48	0,00	11,15
1	1,48	0,30	1,04	0,00	11,22
2	1,56	0,30	0,88	0,00	11,44
4	1,84	0,30	0,32	0,00	11,53
8	0,78	0,20	2,44	0,00	11,32
21	0,24	0,10	3,52	8,22	9,40
24	1,68	0,15	0,00	0,00	10,81
Total añadido (g)			13,68	8,22	
Consumo (Kg/TM)			13,68	8,22	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,80	7,55	13,59	70,82
Solución lavado (L.)	1,00	0,42	0,42	2,19
Relave (Kg)	1,00	5,18	5,18	26,99
Alimentación recalculada	19,19		19,19	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 73,01%				
Au en solución: 14,01mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	2,54	5,08	26,47
1	3,22	6,44	33,56
2	3,94	7,88	41,06
4	4,88	9,76	50,86
8	5,86	11,72	61,07
21	6,48	12,96	67,54
24	6,51	13,02	67,85



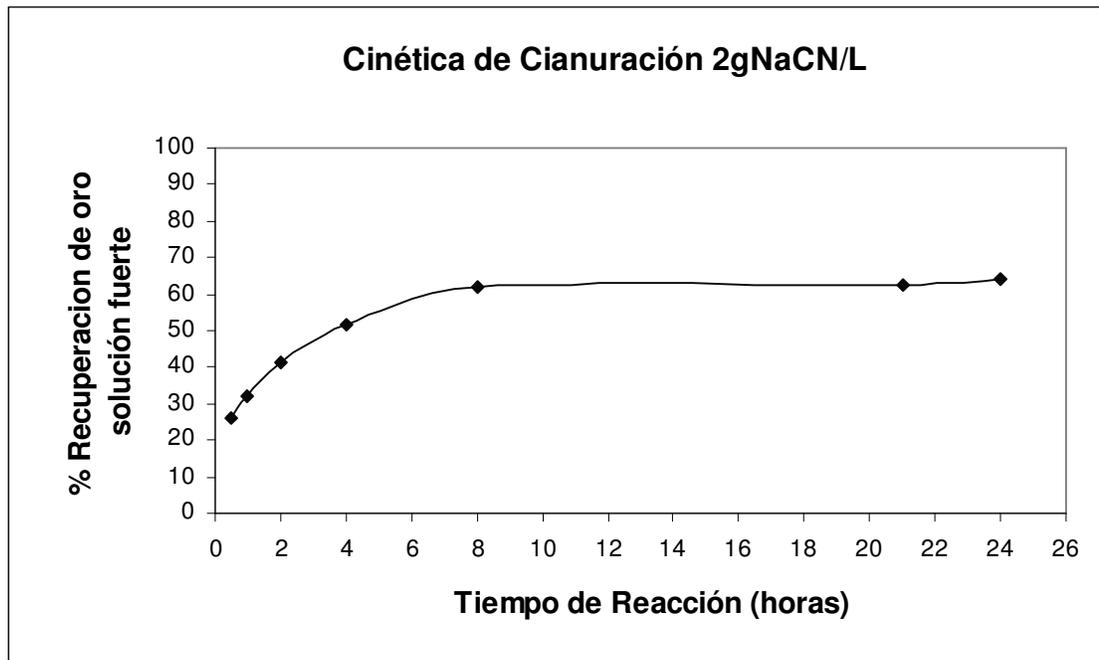
Cianuración estándar con adición de peróxido de Sodio Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, mineral Playa Dorada.  
Replica 3

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración					
Molienda			Cianuración		
Tiempo:	30min		Tiempo	24 horas	
Peso material:	1Kg.		Peso del mineral	1 Kg	
% Sólidos:	62,50%		% Sólidos	33,33%	
Volumen de agua	0,6L		pH inicial:	7,62	
			pH trabajo:	10,49	
			Adición de cal:	0,00g	
			Tiempo pre-aireación:	0,5 horas	
			Conc cianuro libre:	2g/L	
			Conc peróxido de Sodio	5g/Kg	

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,22	4,00	0,00	10,49
0,5	1,24	0,35	1,52	0,00	11,18
1	1,49	0,35	1,02	0,00	11,23
2	1,54	0,32	0,92	0,00	11,41
4	1,80	0,32	0,40	0,00	11,55
8	0,82	0,23	2,36	0,00	11,31
21	0,32	0,12	3,36	8,16	9,35
24	1,70	0,14	0,00	0,00	10,79
Total añadido (g)			13,58	8,16	
Consumo (Kg/TM)			13,58	8,16	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,80	7,09	12,76	67,20
Solución lavado (L.)	0,99	1,02	1,01	5,32
Relave (Kg)	1,00	5,22	5,22	27,49
Alimentación recalculada	18,99		18,99	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 72,52%				
Au en solución: 13,77mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	2,51	5,02	26,33
1	3,02	6,04	31,80
2	3,90	7,80	41,07
4	4,92	9,84	51,81
8	5,86	11,72	61,71
21	5,96	11,92	62,76
24	6,09	12,18	64,13



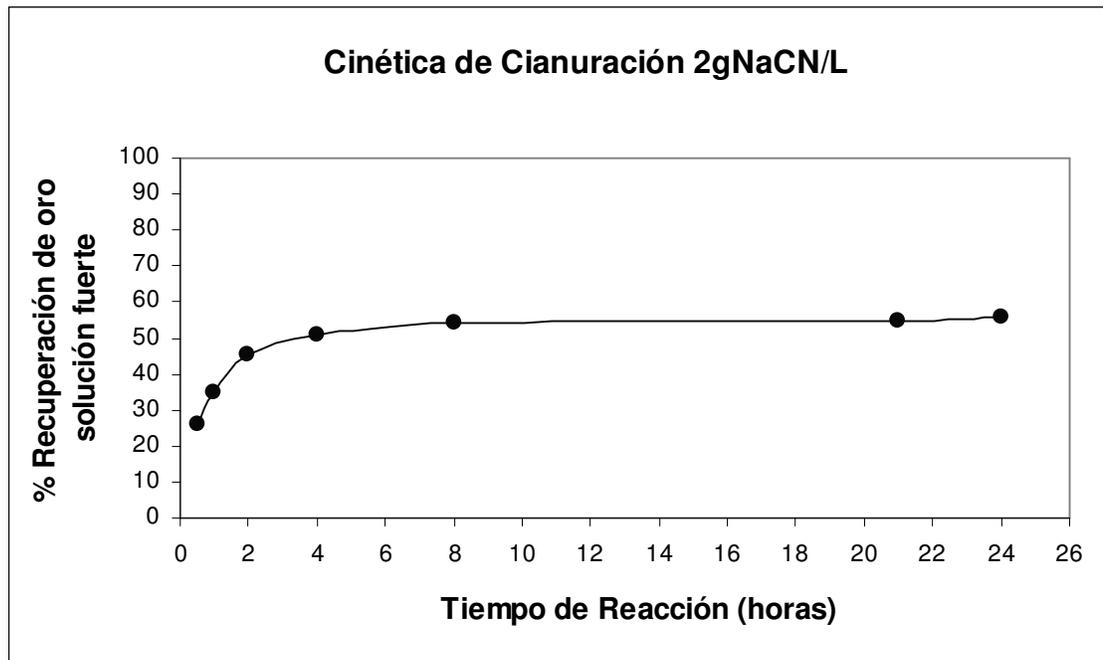
Cianuración estándar con cianuración en molienda e inyección de aire, mineral Playa Dorada. Replica 1

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración					
Molienda			Cianuración		
Tiempo:	30min		Tiempo	24 horas	
Peso material:	1Kg.		Peso del mineral	1 Kg	
% Sólidos:	62,50%		% Sólidos	33,33%	
Volumen de agua	0,6L		pH inicial:	7,65	
			pH trabajo:	10,05	
			Adición de cal:	4,04g	
			Tiempo pre-aireación:	0,5 horas	
			Inyección de aire	24 horas	
			Conc cianuro libre:	2g/L	

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	2,020	1,20	4,04	10,05
0,5	0,05	0,025	3,90	0,89	9,82
1	1,35	0,025	1,30	0,00	10,78
2	1,35	0,025	1,30	0,00	10,90
4	1,35	0,050	1,30	0,00	10,87
8	0,65	0,075	2,70	0,00	10,54
21	0,25	0,050	3,50	3,29	9,50
24	1,00	0,050	0,00	0,00	10,46
Total añadido (g)			15,20	8,22	
Consumo (Kg/TM)			15,20	8,22	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,80	6,59	11,86	59,10
Solución lavado (L.)	0,98	1,04	1,02	5,10
Relave (Kg)	1,00	7,19	7,19	35,80
Alimentación recalculada	20,07		20,07	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 64,20%				
Au en solución: 12,88mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	2,60	5,20	25,91
1	3,48	6,96	34,70
2	4,52	9,04	45,01
4	5,08	10,16	50,61
8	5,43	10,86	54,13
21	5,49	10,98	54,70
24	5,60	11,22	55,80



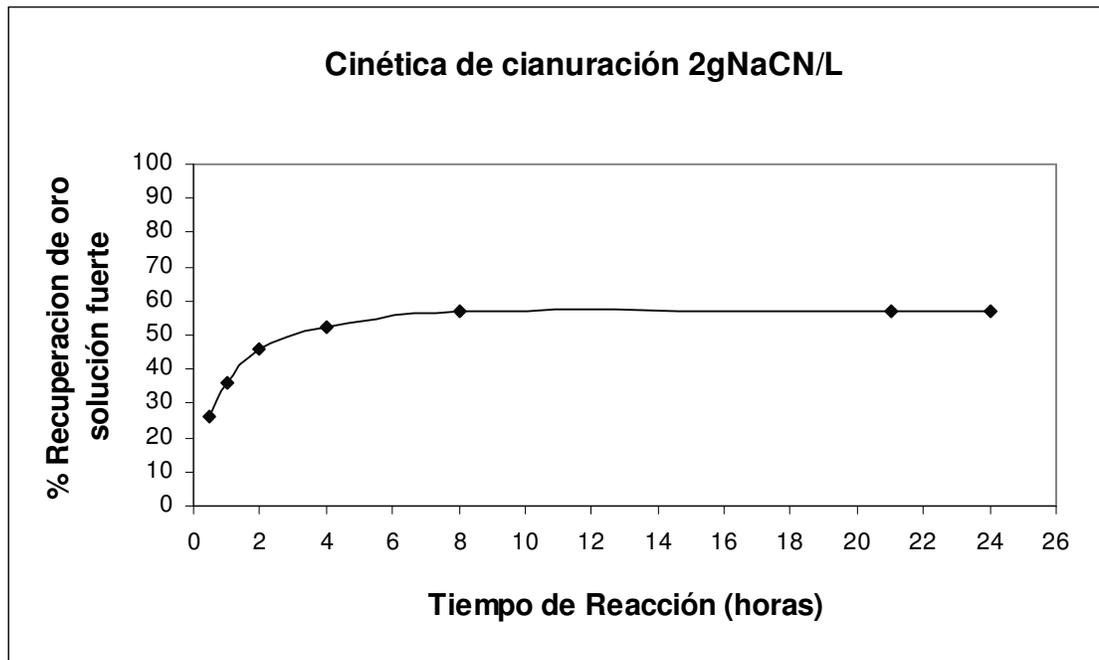
Cianuración estándar con cianuración en molienda e inyección de aire, mineral Playa Dorada. Replica 2

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración					
Molienda			Cianuración		
Tiempo:	30min		Tiempo	24 horas	
Peso material:	1Kg.		Peso del mineral	1 Kg	
% Sólidos:	62,50%		% Sólidos	33,33%	
Volumen de agua	0,6L		pH inicial:	7,22	
			pH trabajo:	10,10	
			Adición de cal:	4,00g	
			Tiempo pre-aireación:	0,5 horas	
			Inyección de aire	24 horas	
			Conc cianuro libre:	2g/L	

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	2,000	1,20	4,00	10,10
0,5	0,07	0,023	3,86	0,90	9,85
1	1,34	0,022	1,32	0,00	10,81
2	1,35	0,026	1,30	0,00	10,92
4	1,36	0,052	1,28	0,00	10,85
8	0,68	0,072	2,64	0,00	10,55
21	0,27	0,053	3,46	3,30	9,48
24	1,00	0,051	0,00	0,00	10,48
Total añadido (g)			15,06	8,20	
Consumo (Kg/TM)			15,06	8,20	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,70	6,62	11,25	57,79
Solución lavado (L.)	1,00	1,12	1,12	5,75
Relave (Kg)	1,00	7,10	7,10	36,46
Alimentación recalculada	19,47		19,47	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 63,54%				
Au en solución: 12,37mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	2,56	5,12	26,29
1	3,51	7,02	35,95
2	4,48	8,96	46,01
4	5,10	10,20	52,38
8	5,52	11,04	56,69
21	5,54	11,08	56,90
24	5,55	11,10	57,00



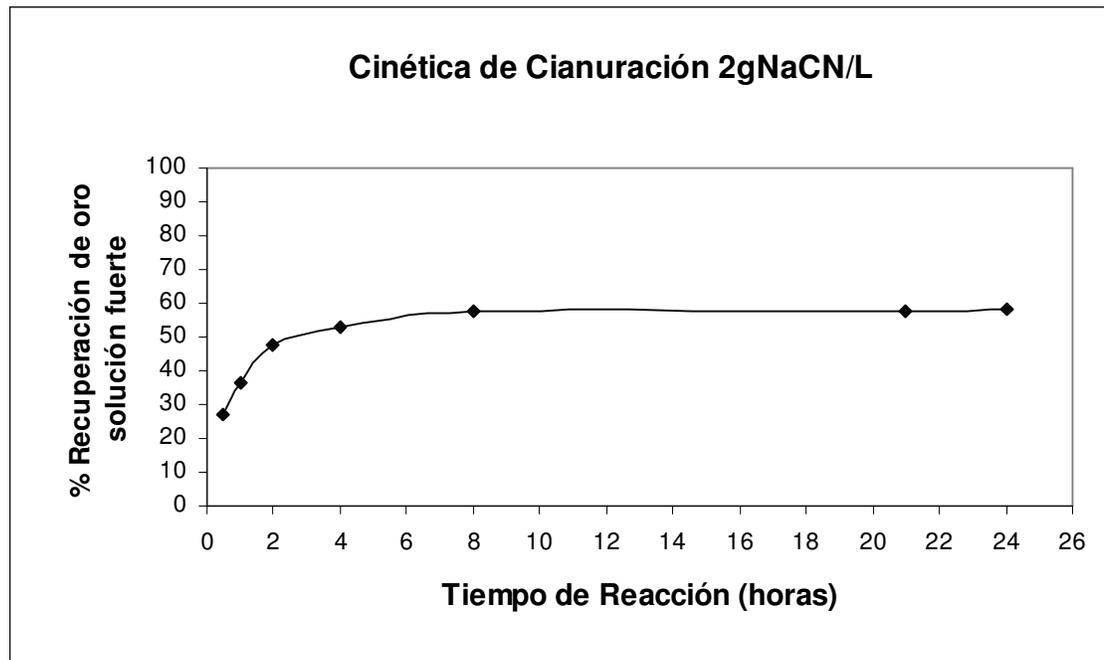
Cianuración estándar con cianuración en molienda e inyección de aire, mineral Playa Dorada. Replica 3

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración					
Molienda			Cianuración		
Tiempo:	30min		Tiempo	24 horas	
Peso material:	1Kg.		Peso del mineral	1 Kg	
% Sólidos:	62,50%		% Sólidos	33,33%	
Volumen de agua	0,6L		pH inicial:	7,5	
			pH trabajo:	10,20	
			Adición de cal:	4,00g	
			Tiempo pre-aireación:	0,5 horas	
			Inyección de aire	24 horas	
			Conc cianuro libre:	2g/L	

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	2,000	1,20	4,00	10,20
0,5	0,06	0,026	3,88	0,93	9,90
1	1,36	0,025	1,28	0,00	10,78
2	1,36	0,027	1,28	0,00	10,92
4	1,35	0,055	1,30	0,00	10,88
8	0,67	0,073	2,66	0,00	10,60
21	0,26	0,052	3,48	3,33	9,50
24	0,98	0,050	0,00	0,00	10,49
Total añadido (g)			15,08	8,26	
Consumo (Kg/TM)			15,08	8,26	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,68	6,69	11,24	58,82
Solución lavado (L.)	0,98	1,06	1,04	5,44
Relave (Kg)	1,01	6,83	6,83	35,74
Alimentación recalculada	19,11		19,11	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 64,26%				
Au en solución: 12,28mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	2,58	5,16	27,00
1	3,48	6,96	36,42
2	4,56	9,12	47,73
4	5,06	10,12	52,96
8	5,49	10,98	57,46
21	5,52	11,04	57,78
24	5,56	11,12	58,20



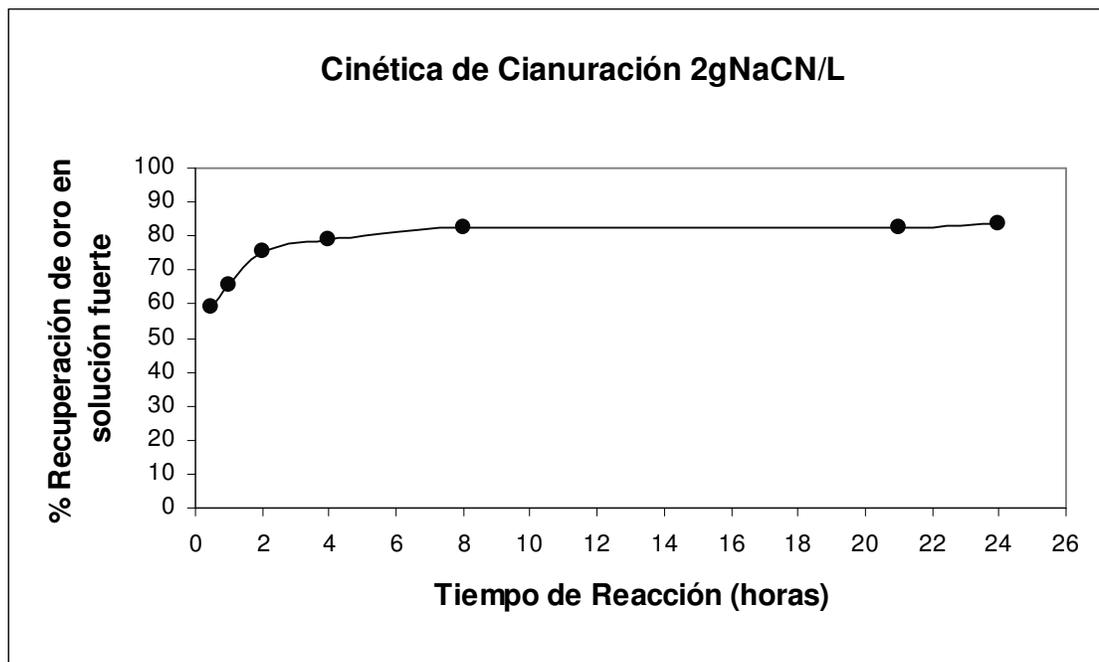
Cianuración estándar con previa tostación oxidante, mineral Playa Dorada. Replica 1

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	6,90
		pH trabajo:	10,50
		Adición de cal:	1,80g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,390	4,00	1,80	10,50
0,5	0,50	0,200	3,00	1,02	10,56
1	1,35	0,150	1,30	0,40	10,63
2	1,48	0,170	1,04	1,22	10,72
4	1,66	0,150	0,68	0,50	11,29
8	1,50	0,100	1,00	0,00	11,22
21	1,49	0,100	1,02	1,15	11,12
24	1,10	0,050	0,00	0,00	10,97
Total añadido (g)			12,04	6,09	
Consumo (Kg/TM)			12,04	6,09	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,80	9,17	16,51	86,70
Solución lavado (L.)	0,98	0,93	0,91	4,80
Relave (Kg)	1,00	1,63	1,63	8,60
Alimentación recalculada	19,05		19,05	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 91,50%				
Au en solución: 17,42mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	5,62	11,24	59,01
1	6,23	12,46	65,40
2	7,16	14,32	75,21
4	7,52	15,04	79,02
8	7,88	15,76	82,70
21	7,85	15,70	82,40
24	7,96	15,92	83,61



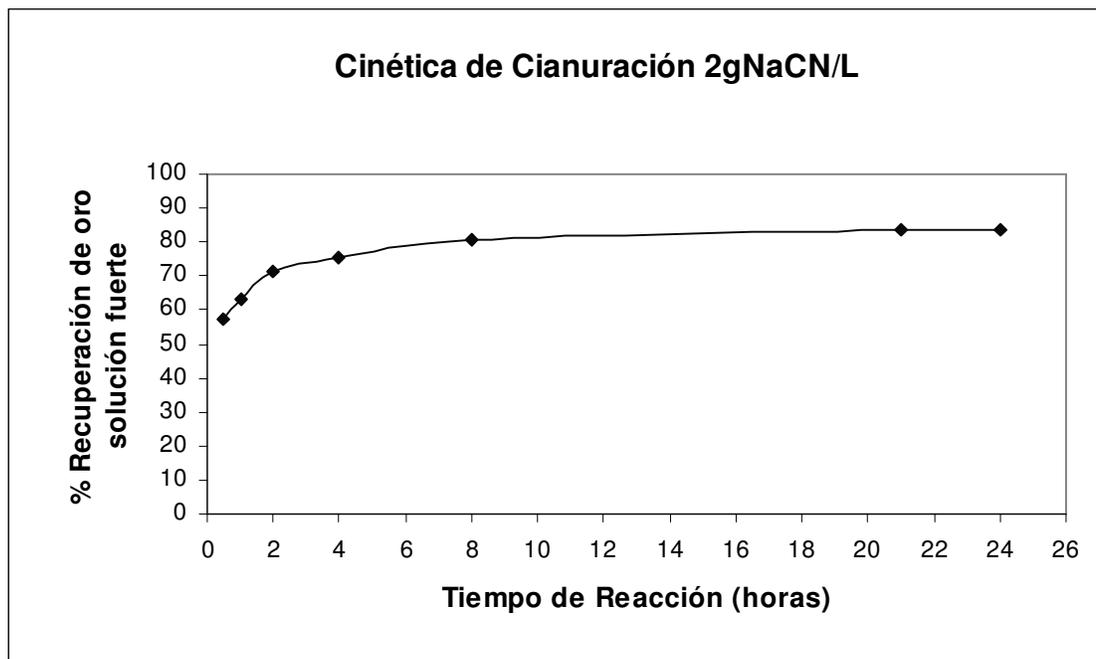
Cianuración estándar con previa tostación oxidante, mineral Playa Dorada. Replica 2

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	6,76
		pH trabajo:	10,53
		Adición de cal:	1,85g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,400	4,00	1,85	10,53
0,5	0,55	0,180	2,90	1,20	10,58
1	1,30	0,150	1,40	0,30	10,60
2	1,42	0,160	1,16	1,00	10,73
4	1,60	0,140	0,80	0,30	11,20
8	1,50	0,150	1,00	0,00	11,25
21	1,66	0,140	0,68	1,50	11,05
24	1,12	0,060	0,00	0,00	10,85
Total añadido (g)			11,94	6,15	
Consumo (Kg/TM)			11,94	6,15	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,84	9,22	16,96	86,00
Solución lavado (L.)	1,00	1,09	1,09	5,50
Relave (Kg)	1,00	1,67	1,67	8,50
Alimentación recalculada	19,72		19,72	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 91,50%				
Au en solución: 18,05mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	5,66	11,32	57,41
1	6,22	12,44	63,12
2	7,02	14,04	71,20
4	7,42	14,84	75,20
8	7,96	15,92	80,71
21	8,22	16,44	83,30
24	8,26	16,52	83,81



Cianuración estándar con previa tostación oxidante, mineral Playa Dorada. Replica 3

Condiciones empleadas para el proceso de cianuración			
Molienda		Cianuración	
Tiempo:	30min	Tiempo	24 horas
Peso material:	1Kg.	Peso del mineral	1 Kg
% Sólidos:	62,50%	% Sólidos	33,33%
Volumen de agua	0,6L	pH inicial:	6,82
		pH trabajo:	10,53
		Adición de cal:	1,78g
		Tiempo pre-aireación:	0,5 horas
		Conc cianuro libre:	2g/L

Control del proceso de cianuración					
Tiempo (h)	[CN] (g/L)	[CaO] (g/L)	NaCN Añadido (g)	CaO Añadido (g)	pH
0	2,00	0,440	4,00	1,78	10,53
0,5	0,48	0,330	3,04	1,16	10,60
1	1,33	0,220	1,34	0,35	10,65
2	1,48	0,160	1,04	1,11	10,80
4	1,66	0,145	0,68	0,50	11,02
8	1,45	0,142	1,10	0,00	11,20
21	1,71	0,140	0,58	1,26	11,10
24	1,20	0,070	0,00	0,00	10,90
Total añadido (g)			11,78	6,16	
Consumo (Kg/TM)			11,78	6,16	

Resultados	Productos finales	Leyes Au		Recuperación Au (%)
		(mg/L) ó (mg/Kg)	(mg)	
Solución Fuerte (L.)	1,80	9,40	16,92	86,00
Solución lavado (L.)	0,98	1,19	1,17	5,90
Relave (Kg)	1,00	1,58	1,58	8,00
Alimentación recalculada	19,67		19,67	100,00
% Recuperación Au en solución: (SF + SL) 91,90%				
Au en solución: 18,09mg				

Cinética del proceso de cianuración			
Tiempo (horas)	Contenido de oro (mg/L)	Contenido de oro (mg)	Recuperación de oro (%)
0,5	5,72	11,44	58,20
1	6,25	12,51	63,61
2	7,32	14,64	74,39
4	7,77	15,54	79,00
8	8,12	16,24	82,58
21	8,29	16,58	84,29
24	8,33	16,66	84,69

