



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

**AREA TECNICA**

**INGENIERO EN GEOLOGÍA Y MINAS**

TRABAJO DE TITULACION

Aplicación del método concentración gravimétrica  
centrífuga con Knelson en relaveras para la recuperación  
de oro en material de granulometría fina en la concesión  
minera “San Carlos”

**Autor:** Chamba Coronel, José David

**Director:** Sanmartín Gutiérrez, Víctor Aurelio

CENTRO UNIVERSITARIO LOJA

2022



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2022

## Aprobación del director del Trabajo de Titulación

Loja, 24, enero, 2022

PhD. José Arturo Guartan.

**Coordinador(a) de Titulación**

Ciudad.-

Loja

De mi consideración:

El presente Trabajo de Titulación denominado: **Aplicación del método concentración gravimétrica centrífuga con Knelson en relaveras para la recuperación de oro en material de granulometría fina en la concesión minera “San Carlos”** realizado por José David Chamba Coronel, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Firma del Director del Trabajo de Titulación

Mgr. Víctor Sanmartín Gutiérrez

C.I.: 1101873204

### Declaración de autoría y cesión de derechos

“Yo, José David Chamba Coronel, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

- Ser autor(a) del Trabajo de Titulación denominado: **Aplicación del método concentración gravimétrica centrífuga con Knelson en relaveras para la recuperación de oro en material de granulometría fina en la concesión minera “San Carlos”**, de la Titulación Geología y Minas, específicamente de los contenidos comprendidos en: Introducción, Capítulo 1. Generalidades, Capítulo 2. Características físicas - geográficas del distrito minero Nambija “San Carlos de las Minas”, Capítulo 3. Marco teórico “geológico”, Capítulo 4. Método de concentración gravimétrica centrífuga knelson, Capítulo 5. Metodología, Capítulo 6. Discusión de resultados, Conclusiones y Recomendaciones, siendo Víctor Aurelio Sanmartín Gutiérrez completos, director (a) del presente trabajo; y, en tal virtud, eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual. Además, ratifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo son de mi exclusiva responsabilidad.
- Que mi obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.
- Autorizo a la Universidad Técnica Particular de Loja para que pueda hacer uso de mi obra con fines netamente académicos, ya sea de forma impresa, digital y/o electrónica o por cualquier medio conocido o por conocerse, sirviendo el presente

instrumento como la fe de mi completo consentimiento; y, para que sea ingresada al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Autor: José David Chamba Coronel

C.I.: 1105211948

## **Dedicatoria**

El presente trabajo va dedicado a mis padres que con su apoyo he logrado cumplir una meta más en mi vida profesional gracias a ellos he logrado superarme y poder formarme.

A mi abuelito Carlos Coronel Pinta ya que fue uno de mis pilares más importantes de formación.

## **Agradecimiento**

Agradezco a la Universidad Técnica Particular de Loja, que me ayudo para mi formación profesional y personal, en especial al Departamento de Geología y Minas, que cuenta con personal eficiente para impartir sus conocimientos.

Agradezco a Dios por darme la vida, salud, sabiduría y paciencia.

Agradezco a mi director de tesis, Víctor Sanmartín, que supo compartir sus conocimientos y tiempo, durante todo el desarrollo de la tesis.

Agradezco a mis papas por todo el apoyo que me han dado toda mi vida, la vida me quedaría corta para devolverles todo lo que me han sabido brindar.

## Índice de contenidos

Aprobación del director del Trabajo de Titulación.....	II
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	III
Dedicatoria.....	V
Agradecimiento .....	VI
Resumen .....	1
Abstract .....	2
Capítulo uno.....	5
Generalidades.....	5
1.1 Justificación de la problemática.....	5
1.2 Objetivos.....	7
1.2.1 General .....	7
1.2.2 Específicos.....	7
1.3 Hipótesis.....	7
Capítulo dos.....	8
Características físicas - geográficas del distrito minero Nambija “San Carlos de las minas”.....	8
2.1. Ubicación y acceso.....	8
2.2. Clima .....	9
2.3. Topografía .....	9
2.4. Historia de exploración y explotación .....	10
Capítulo tres.....	12
Marco teórico “geológico”.....	12
3.1 Geología regional .....	12
3.1.1 Estratigrafía .....	14
3.1.1.1 Litología Pre-A Syn-Batolíticas .....	14
3.1.1.2 Litologías Post-Batolíticas .....	15
3.1.2 Ambiente tectónico .....	16
3.1.3 Estructuras .....	16
3.2 Geología local .....	17
3.3 Geología a detalle .....	18
Capítulo cuatro.....	19
Método de concentración gravimétrica centrífuga knelson .....	19
4.1 Concentrador centrífugo Knelson .....	19
• Parámetros de operación .....	22
4.2 Concentradores centrífugos.....	23
4.2.1 Concentración centrífuga .....	25

4.2.2	Principio de concentración gravimétrica .....	25
	Capítulo cinco .....	27
	Metodología .....	27
5.1.	Flujograma.....	27
5.2.	Recopilación y validación de información.....	28
5.3.	Muestreo.....	28
5.4.	Preparación de la muestra .....	29
5.4.1.	Homogenización y cuarteo .....	30
5.5.	Caracterización del mineral.....	32
5.5.1.	Análisis mineralógico .....	32
5.5.1.1.	Difractometría de Rayos x.....	32
5.5.2.	Análisis físico.....	33
5.5.2.1.	Peso específico .....	33
5.5.2.2.	Análisis granulométrico.....	35
5.5.3.	Análisis Químico.....	36
5.5.3.1.	Método de ensayo al fuego .....	36
❖	Fusión.....	36
❖	Copelación .....	36
❖	Ataque químico.....	37
5.6.	Concentración Gravimétrica Centrifuga con Knelson .....	38
5.6.1.	Molienda.....	38
5.6.2.	Diseño Experimental .....	40
5.6.2	Procedimiento para realizar la concentración con Knelson.....	41
	Capítulo seis .....	43
	Discusión de resultados .....	43
6.1.	Caracterización del mineral.....	43
6.1.1	Peso Específico.....	43
6.1.2	Análisis Granulométrico de cabeza .....	43
6.2	Análisis mineralógico.....	44
6.2.1	Difractometría de rayos x .....	44
6.2.2	Fluorescencia de rayos x.....	45
6.3	Análisis Químico .....	46
6.3.1	Ley de cabeza .....	46
6.4	Ensayos metalúrgicos Knelson .....	46
6.4.1	Molienda.....	46
6.4.2	Ensayos Knelson .....	48
6.5	Análisis Económico a nivel de laboratorio utilizando el método Gravimétrico Knelson.....	50

Conclusiones.....	52
Recomendaciones.....	53
<b>Referencias</b> .....	54
Apéndice.....	55
Apéndice 1: Ensayos del picnómetro.....	55
Apéndice 2: Ley de cabeza.....	56
Apéndice 3: Ensayo de Granulometría de cabeza.....	56
Apéndice 4: Ensayos de Granulometría de tiempos de molienda.....	57
Apéndice 5. Datos y parámetros de operación, Balances metalúrgicos, calculo rendimiento y radio de concentración.....	59

### Índice de tablas

Tabla1. <i>Variables dependientes e independientes</i> .....	40
Tabla2. <i>Etapas de ensayos a elaborarse para el k Nelson</i> .....	41
Tabla3. <i>Peso específico método del picnómetro</i> .....	43
Tabla4. <i>Valores de análisis Granulométrico</i> .....	43
Tabla5. <i>Valores de análisis DRX</i> .....	44
Tabla6. <i>Valores en porcentajes de fluorescencia de rayos x</i> .....	45
Tabla7. <i>Datos ley de cabeza</i> .....	46
Tabla8. <i>Tiempos de molienda</i> .....	46
Tabla9. <i>Resultados de ensayo metalúrgico Knelson</i> .....	48
Tabla10. <i>Cálculo de precio de Au en una Tonelada</i> .....	50
Tabla11. <i>Cálculo del precio de operación de un ensayo en knelson</i> .....	51
Tabla12. <i>Análisis económico a nivel de laboratorio</i> .....	51

### Índice de imágenes

Imagen1. <i>Ubicación del Distrito Minero Nambija y San Carlos de las Minas</i> .....	8
Imagen2. <i>Mapa estructural del Distrito Nambija</i> .....	13
Imagen3. <i>Concentrador centrífugo Knelson</i> .....	20
Imagen4. <i>Recolección de la muestra</i> .....	29
Imagen5. <i>Homogenización y cuarteo</i> .....	30
Imagen6. <i>Pulverización</i> .....	31
Imagen7. <i>Equipo de fluorescencia de rayos x</i> .....	33
Imagen8. <i>Peso específico (Picnómetro)</i> .....	34
Imagen9. <i>Proceso de Granulometria</i> .....	35
Imagen10. <i>Proceso de copelacion (Dore)</i> .....	37
Imagen11. <i>Proceso de ataque químico (Digestión)</i> .....	38
Imagen12. <i>Molienda</i> .....	39
Imagen13. <i>Equipo Knelson</i> .....	42

Imagen14.	<i>Difractograma</i> .....	45
Imagen15.	<i>Curvas granulométricas de molienda</i> .....	47
Imagen16.	<i>Grafico estadístico de Rendimiento de los ensayos Knelson</i> .....	49

## Resumen

La presente investigación es de manera experimental, impulsada por el Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja, está orientada a la aplicación de métodos gravimétricos de recuperación de oro con materia de relave en el sector de "San Carlos" y se desarrolló con toma de muestra de los relaves, para lo cual se apoyó en material bibliográfico así como un correcto análisis de laboratorio y un análisis de gabinete.

Para lo cual se obtuvo una ley inicial de 0.12 g/ton, los parámetros adecuados para una recuperación eficiente es una molienda de 25 min en la cual se obtuvo una granulometría de #120 mallas con 80 % de material pasante para los ensayos de knelson con una presión de agua de 1Psi y 60 Fuerzas G donde nos permitió obtener una ley de concentrado de 2.27 g/ton y un rendimiento de 70% considerando como un buen rendimiento.

El proyecto de investigación contribuye a generar información sobre la aplicación de los ensayos centrífugos de gravimetría knelson en la minería, tomando en cuenta que estos no son agresivos con el medio ambiente, para lo cual se ha realizado una evaluación económica para determinar que el proceso con el cual ensayamos y no es favorables con los resultados obtenidos ya que la ley es demasiada baja, no justifica económicamente.

**PALABRAS CLAVES:** Métodos gravimétricos, laboratorio, ensayo metalúrgico, Knelson, análisis mineralógico, relaves, granulometría, Geología y Minas.

### **Abstract**

The present investigation is experimental, promoted by the Department of Geology and Mines and Civil Engineering of the Universidad Técnica Particular de Loja, is oriented to the application of gravimetric methods of gold recovery with tailings material in the sector of "San Carlos" and was developed with sampling of tailings, for which it was supported by bibliographic material as well as a correct laboratory analysis and a cabinet analysis.

For which an initial grade of 0.12 g/ton was obtained, the adequate parameters for an efficient recovery is a 25 min milling in which a granulometry of #120 mesh was obtained with 80% of passing material for the knelson tests with a water pressure of 1Psi and 60 G Forces where we obtained a concentrate grade of 2.27 g/ton and a yield of 70% considered as a good yield.

The research project contributes to generate information on the application of centrifugal knelson gravimetric tests in mining, taking into account that these are not aggressive with the environment, for which an economic evaluation has been made to determine that the process with which we tested and is not favorable with the results obtained since the grade is too low, does not justify economically.

**KEYWORDS:** Gravimetric methods, laboratory, metallurgical test, Knelson, mineralogical analysis, tailings, granulometry, Geology and Mines.

## Introducción

Desde la década de los 80 la provincia de Zamora Chinchipe es considerada como un territorio con cuantiosos recursos minerales, posteriormente la minería artesanal ha venido aplicando actividades mineras las cuales han empleado técnicas deficientes y contaminantes dando como resultado baja recuperación de oro, degradación del medio ambiente y creando riesgos en la salud de las personas de los lugares cercanos a dicha actividad.

En el presente trabajo se utiliza tecnología: haciendo uso de los métodos de concentración gravimétrica centrífuga, aunque son poco aplicados en la minería artesanal y en la pequeña minería son equipos de fácil operación, mantenimiento y bajo coste económico. Se espera que este tipo de técnicas puedan ser aplicadas por los mineros artesanales como alternativa al uso de mercurio y se minimice los impactos ambientales.

La presente investigación experimental se desarrolla para analizar diferentes métodos de recuperación de oro ya que en la minería artesanal o pequeña minería tienen inconvenientes para encontrar un método apropiado para la recuperación de oro en depósitos aluviales donde hay una baja eficiencia en la recuperación mineral aluvial de granulometría fina.

En la extracción del mineral se utiliza métodos gravimétricos, el proceso de lavado de las gravas auríferas se lo realiza con clasificadoras Tipo Z, se inicia con la alimentación del material extraído, en una tolva fija inclinada dotada en su parte final de un sistema de lavado a presión en forma de duchas, que permite que el material se desplace hacia una parrilla que separa los materiales gruesos de los medios y finos.

El material lavado se desplace sobre tres canalones inclinados, los mismos que se encuentran cubiertos por una fibra sintética y parrillas tipo rifles donde se va depositando el concentrado para la recuperación del Au de granulometría gruesa, mas

no el fino. Se obtiene una eficiencia menor del 50%, siendo este porcentaje no recomendable para la extracción del mineral el cual produce una pérdida en las minas de San Carlos.

El concentrador centrífugo Knelson es un equipo muy versátil y productivo ya que efectúa una separación con alta eficiencia. La operación del equipo Knelson será bajo determinadas variables sin modificación alguna es decir, siguiendo el protocolo desarrollado y establecido por (Laplante, 1994).

## Capítulo uno

### Generalidades

#### 1.1 Justificación de la problemática

La presente investigación experimental se desarrolla para analizar diferentes métodos de recuperación de oro ya que en la minería artesanal o pequeña minería tienen inconvenientes para encontrar un método apropiado para la recuperación de oro en depósitos aluviales donde hay una baja eficiencia en la recuperación mineral aluvial de granulometría fina.

En la extracción del mineral se utiliza métodos gravimétricos, el proceso de lavado de las gravas auríferas se lo realiza con clasificadoras Tipo Z, se inicia con la alimentación del material extraído, en una tolva fija inclinada dotada en su parte final de un sistema de lavado a presión en forma de duchas, que permite que el material se desplace hacia una parrilla que separa los materiales gruesos de los medios y finos.

El material lavado se desplace sobre tres canalones inclinados, los mismos que se encuentran cubiertos por una fibra sintética y parrillas tipo rifles donde se va depositando el concentrado para la recuperación del Au de granulometría gruesa, mas no el fino. Se obtiene una eficiencia menor del 50%, siendo este porcentaje no recomendable para la extracción del mineral el cual produce una pérdida en las minas de San Carlos.

También se puede señalar que la explotación de los placeres auríferos o yacimientos secundarios constituye uno de los métodos más antiguos y elementales de la extracción de oro en el Ecuador, donde se prevalece el peso específico del oro para lograr su concentración gravimétrica y separarlo de los sedimentos pesados. Las principales actividades que se realizan son principalmente: clasificación de las gravas auríferas y separación de sedimentos pesados, concentración y separación del oro de los sedimentos pesados, recuperación del oro mediante procesos de amalgamación con mercurio y destilación de la amalgama para la separación del oro del mercurio.

En los procesos de clasificación y separación se han ido incorporando dragas pequeñas con canalones metálicos de estrías, que sirven de trampas para capturar los sedimentos más pesados con oro; y bombas de succión, que permiten atrapar los sedimentos finos del lecho de los ríos y proporcionan el agua necesaria para la concentración de los sedimentos pesados. La recuperación del oro se realiza por amalgamación.

Existen varios métodos alternativos de recuperación de oro que se pueden aplicar en la extracción de oro del material fino o relave, recuperando un mayor porcentaje de Au de la relavera y aplicando métodos no contaminantes hacia la población y el medio ambiente. Donde se ha optado como una de las mejores alternativas utilizar el método de concentración gravimétrica centrífuga con Knelson ya que presenta algunas ventajas como una recuperación eficiente, rápida y no contaminante.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

- Aplicar el método de concentración gravimétrica con centrifuga con Knelson para mejorar la recuperación de oro en material de relaves en la concesión minera “San Carlos”

### **1.2.2 Específicos**

- Caracterizar el mineral, química, física y mineralógicamente.
- Realizar concentración gravimétrica centrifuga con knelson, utilizando los parámetros granulométricos de #120 mallas, #200mallas y 60, 90 Fuerzas G para obtener una adecuada recuperación de oro en relaveras.
- Evaluar económicamente el proceso en la recuperación de oro utilizando el método de concentración gravimétrica centrifuga con Knelson.

## **1.3 Hipótesis**

Al utilizar adecuados parámetros en el proceso de concentración gravimétrica con knelson encontraremos una buena recuperación de oro en material fino de los relaves en la concesión minera San Carlos de las minas

## Capítulo dos

### Características físicas - geográficas del distrito minero Nambija “San Carlos de las minas”

#### 2.1. Ubicación y acceso

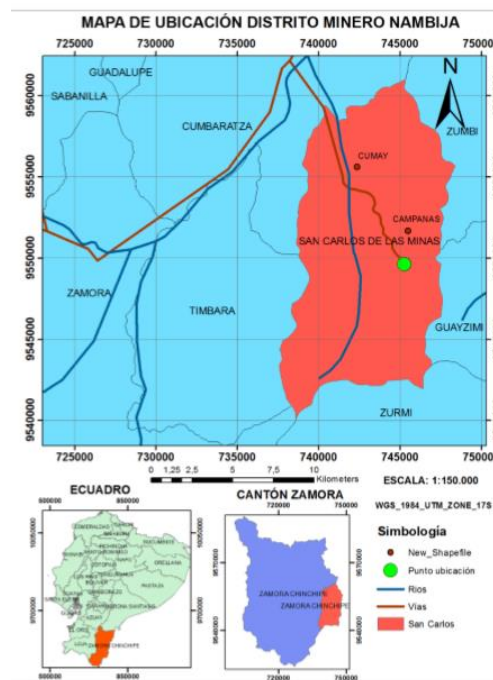
La concesión minera está ubicada en la zona Subandina, el flanco occidental de la cordillera de Nanguipa. Paladines y Soto (2010, p.165).

Este yacimiento aurífero que abarca un área de 69 hectáreas se sitúa al Sur - Oriente del Ecuador, perteneciente a la provincia de Zamora Chinchipe, cantón Zamora, Parroquia San Carlos de las minas.

El acceso se realiza desde la ciudad de Zamora, en dirección a Yanzatza por vía asfaltada hasta la población de Namirez. Desde esta población cruzando el puente sobre el río Zamora, se sigue por carretera lastrada hasta la concesión minera.

#### Imagen1.

*Ubicación del Distrito Minero Nambija y San Carlos de las Minas*



Nota: Extraído de SIGTIERRAS, 2013.

## **2.2 Clima**

El ambiente que predomina en el sector es un clima húmedo tropical que se caracteriza porque todos los meses tienen una temperatura media superior a los 18 °C y las precipitaciones anuales promedio son de 1500 a 2000 mm. Bajo estas condiciones en esta zona existen lluvias abundantes a lo largo del año por lo que no hay una estación seca, ya que todos los meses superan los 60 mm, siendo así uno de los lugares más húmedos del Ecuador.

## **2.3 Topografía**

El proyecto minero se desarrolla dentro de la concesión minera SAN CARLOS, código 695, ubicada en la parroquia San Carlos de las Minas, Cumbaratza, cantón Zamora, provincia de Zamora Chinchipe. La zona donde se encuentra la concesión minera se caracteriza por presentar cotas que van desde los 900 msnm a 1400 msnm. La concesión minera en si abarca principalmente las terrazas aluviales del rio Nambija donde existe fragmentos centimétricos y métricos de diversos tipos de roca ígnea, sedimentaria y metamórfica, las cuales producto del intemperismo han logrado acumular depósitos de considerable valor económico los cuales son una fuente de riqueza para el sector minero, haciendo a estos placeres de un alto interés económico en el rio Nambija y sus afluentes.

El levantamiento topográfico se lo realizó a detalle de la concesión minera “San Carlos”, especialmente de los frentes de explotación donde existe interés mineralógico, esto con la finalidad de partir de la topografía base y tener una idea real de la situación actual del proyecto minero.

El método que se utilizó para realizar el levantamiento topográfico a detalle de toda la concesión minera fue mediante la utilización de un GPS Magellan eXplorist Pro-10 GIS Data Collector y con la ayuda del Software Global Mapper 2018, se obtuvo como resultado curvas de nivel a detalle, con esta base topográfica se realizó algunos

cortes topográficos y se delimitaron las zonas de explotación de material para obtener volúmenes y establecer el mejor método y sistema de explotación.

#### **2.4 Historia de exploración y explotación**

La explotación del oro en la región sureste del Ecuador se lleva a cabo desde la era precolombina. A mediados del siglo XVI, los españoles reanudaron la explotación utilizando la mano de obra indígena, pero a fines de ese siglo las enfermedades y la rebeldía de los indígenas ocasionaron el cierre de la actividad minera por un periodo largo (Ayala, E., 2008). Pero hace aproximadamente 45 años, el yacimiento epitermal de Nambija fue redescubierto por los buscadores de oro que remontaban los arroyos lavando los sedimentos por bateas y canalones.

Al principio, la explotación se hacía discretamente, pero en pocos meses la noticia se esparció por todo el país y a sus alrededores, siendo rápidamente invadida por miles de personas contagiadas por “la fiebre del oro”, denominado de ese modo en el Ecuador. Según estimaciones y relatos de mineros que en la actualidad siguen trabajando en las minas. Lamentablemente, el yacimiento fue y sigue siendo explotado de manera ineficiente y desordenada. Muchos pequeños mineros excavaban sus galerías donde mayor valor de mineralización se encuentre, sin planificar y sin tener en cuenta las más elementales reglas de seguridad como ambientales.

Para accionar los martillos perforadores se utilizaban compresores a motor diésel. Una vez que los taladros perfora, se colocan cargas de dinamita y se destruye la roca. Después se separa visualmente la fracción estéril de la fracción mineralizada o en otros casos es mezclada totalmente para luego ser transportar en seguida al hombro o en carretillas a los molinos chilenos donde la roca es triturada en presencia de agua y la adición de mercurio para amalgamar el oro.

El producto de la molienda se pasa por canalones cubiertas de cobijas de lana el cual separa la fracción pesada de la fina. El material de alta densidad es lavado en

tinajas o tanques y mediante movimientos centrífugos manuales elimina sólidos estériles, de modo que el oro amalgamado se deposita en la base de los recipientes, luego de ello es puesto en bateas para ser una vez más lavado y por último se coloca en una tela para exprimir el mercurio sobrante y obtener al final una bola de amalgama de Hg + Au que luego se quema al soplete para que el mercurio se expanda por ebullición y obtener oro relativamente puro. En alguno de los casos el oro es transportado después a la sucursal local del Banco Central que compra el metal después de haberlo fundido y pesado, o era vendido a personas naturales que hacían comercio con el metal.

## Capítulo tres

### Marco teórico “geológico”

#### 3.1 Geología regional

El Ecuador ocupa una posición de importancia geológica fundamental: incluye parte de un centro de dispersión oceánico activo (rift de Galápagos) y parte de un área de tipo subducción entre la corteza oceánica bajo un margen continental (placa de Nazca, bajo la placa Sudamericana), el cual ha generado la Cordillera Andina que divide al territorio del Ecuador en tres regiones geológicas y geomorfológicas distintas. La Costa que comprende una extensa, plana e interna cuenca al Oeste de los Andes, la Sierra que está compuesta de un cinturón montañoso y el Oriente ubicada al este de la Cordillera Real que incluye la parte plana en la Cuenca Amazónica y la zona Subandina del plegamiento, levantamiento y corrimiento (Prodeminca, 2000)

La Cuenca Amazónica es parte del tras arco de los Andes ecuatorianos, compuesta por sedimentos marinos y aportes erosivos del cratón Guayanés. Sus deformaciones actuales observadas, así como la estructuración de sus campos petrolíferos resultan de la inversión tectónica de antiguas fallas normales ligadas a un sistema de rift de edad Triásico. Estas fallas, actualmente inversas y de fuerte buzamiento están en dirección N-S a NNE-SSO, sectores donde se han encontrado los principales campos petrolíferos del país (Prodeminca, 2000)

La zona Subandina es la división morfoestructural transicional entre la cuenca amazónica y la sierra andina alta. Comprende una franja relativamente estrecha de rocas falladas y deformadas que se han producido en la orogenia y el levantamiento Andino en el Terciario. Se encuentra asociados a tres complejos de batolitos: La Bonita, Abitagua y Complejo Intrusivo Zamora. Este cinturón este instruido por batolitos de granitoides tipo “I” (Prodeminca, 2000).

El distrito Minero de Zamora comprende parte de la región morfoestructural de las Sierra del Condor dentro de la Zona Subandina. Este distrito incluye los campos

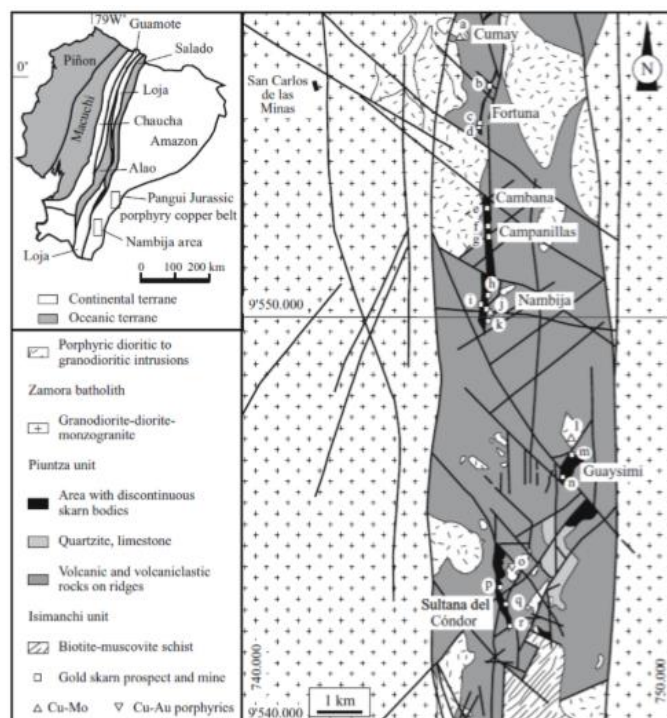
mineros del: Cinturón de Nambija, Campo Minero de Chinapintza y el Cinturón Porfídico San Juan Bosco (Litherland, Aspen & Jemielita, 1994).

El Distrito Nambija está localizado en el flanco occidental de la cordillera de Nanguipa. Comprende los yacimientos de Nambija, Guaysimi, Sultana del Condor, Cambana y Fortuna, se trata de mineralizaciones de skarn relacionados a una estructura tipo Graben de orientación N-S definiendo el cinturón de Nambija (Litherland et al, 1994).

Estructuralmente, Nambija presenta un primer sistema de fallas con direcciones de N-S, responsable de los hundimientos y de la creación de un graben, y que a su vez delimitan zonas metalogénicas. Los sistemas subsiguientes son fallas NE-SW y NW-SE a lo largo de los cuales se encuentran basaltos alcalinos y diques de dolerita, respectivamente. Finalmente, serían intervenidos los planos EW y NS, de manera posiblemente conjugada, y los numerosos intrusivos félsicos se habrían insertado según esos planos de fractura (Prodeminca, 2000).

## Imagen2.

Mapa estructural del Distrito Nambija.



Nota: Modificado por Prodeminca, 2000. Elaborado por Prodeminca, 2000

### 3.1.1 Estratigrafía

#### 3.1.1.1 Litología Pre-A Syn-Batolíticas

La división Zamora acontece al este de la Cordillera Real, limitando el borde occidental del cratón Sudamericano. Está compuesto primordialmente por batolitos, rocas meta sedimentarias, rocas volcánicas y metavolcanosedimentos.

- **La Unidad Piuntza**

Edad triásica, es calificada como la primera unidad litológica aflorante, presentándose como techos colgantes dentro del batolito de Zamora, lo cual ha producido los skarns mineralizados de los campos mineros Nambija, Piuntza y María Elena. Compuesta litológicamente de secuencias de rocas volcano-sedimentarias de origen continental y marino (calizas, una variedad de lutitas calcáreas, areniscas, tobas de grano fino, flujos de lava, brechas de composición andesítica a dacítica) afectadas por procesos de skarnificación (Litherland et al, 1994).

- **La Unidad Chapiza**

(Jurásico - Cretácico) abarca una sucesión de sedimentos clásticos de tipo continental buzando con bajo ángulo los cuales forman la cordillera de Cutucú. la potencia de sus secuencias varia de 600 a 4500 metros, siendo las facies volcánicas más sobresaliente hacia el Norte. Esta unidad también ocurre en el campo minero Pachicutza donde irregularmente esta sobreyacida por los volcánicos de Misahualli (Litherland et al, 1994).

Generalmente Chapiza comprende una secuencia de capas rojas de lutitas, areniscas, conglomerados interestratificados con tobas violáceas grises y verdes, brechas tobáceas y basaltos, a si también presenta delgados horizontes de yeso, dolomita y anhidrita (Litherland et al, 1994).

- **La Unidad Misahualli**

Contiene principalmente rocas volcánicas calco-alcálicas de origen continental Subandina, sobreyacen a la Formación Santiago, está debajo de la formación Hollín. Comprende basaltos, traquitas verdes a grises, tobas y brechas tobáceas violetas a rosadas, lutitas rojas, areniscas y conglomerados. Se han reportado estructuras de pillows en basaltos al este del Río Nangaritza (Litherland et al, 1994).

- **Batolito de Zamora**

Este cuerpo intrusivo alargado de dimensiones: 200 km de largo y 50 km de ancho, se encuentra fraccionado por las fallas La Canea y Nangaritza. Pertenece a la zona sur de la Unidad Granitoides Zamora. Litológicamente se pueden encontrar granodioritas de hornblenda-biotita y dioritas (Litherland et al, 1994). Los granitoides de Zamora son cuerpos batolíticos prolongados que están limitados hacia el oeste por las fallas Cosanga, Méndez y Palanda, relacionados a los batolitos de Rosa Florida, Abitagua y Zamora. Están compuestos cuarzomonzonitas, sienogranitos, monzogranitos y granodioritas de afinidad calco-alcálica (Litherland et al, 1994)

### 3.1.1.2 Litologías Post-Batolíticas

- **Formación Hollín (Cretácico inferior: Albiense, Aptiano)**

Se presenta como bloques discontinuos al Este del batolito de Zamora. Según (Baldock, 1982), son areniscas cuarzosas de color blanco epicontinentales con espesores de 80 a 240 metros donde también se encuentran lutitas fracturadas. Las cuarcitas de esta formación afloran extensamente en la zona subandina, evidenciándose en algunas partes del levantamiento Napo. Forman un importante reservorio de rocas en los campos petrolero del Nororiente ecuatoriano.

- **Formación Napo (Cretácico: Albiano Inferior a Senoniano)**

La formación Napo consiste en una secuencia de lutitas negras, calizas grises a negras y areniscas calcáreas. Sus espesores varían de los 200 hasta los 700 metros, Sobreyace concordante a la Hollín a lo largo de todo el Oriente. La Napo fue sedimentada en un ambiente marino en una cuenca de orientación N-S o en un graben

limitado por fallas con una plataforma mucho menos profunda hacia el Este, donde predominantemente es una facies más arenosa (Baldock, 1982).

- **Formación Tena (Cretácico Superior: Maestrichtiense)**

Son denominadas las capas rojas que sobreyacen a la Napo con aparente concordancia. Litológicamente predominan las lutitas, intercaladas de areniscas y escasos conglomerados con una potencia entre 250 a 1000 metros. Margas y calizas arenáceas aparecen en menor cantidad (Baldock, 1982).

Esta formación es indicadora de un cambio significativo en la sedimentación Cretácica Terciaria en el Oriente, marcando una regresión marina dando inicio a la naciente Cordillera andina (Baldock, 1982).

### 3.1.2 **Ambiente tectónico**

El Distrito minero de Zamora está definido por la extensión del batolito de Zamora, el cual está emplazado dentro del cratón Guayanés al Este (Cordillera Real). El lado Oeste del Cratón Guayanés está definido por la falla de cabalgamiento Palanda y más al Norte por la falla regional Casanga. El batolito de Zamora es una estructura alargada, indeformada y no meteorizada de intrusiones granitoides con edad jurásica, el cual ocurre sobre el Cratón Guayanés formando el cinturón sub andino, el cual está asociado con las rocas volcánicas de la Unidad Misahualli. (Litherland, 1994)

### 3.1.3 **Estructuras**

La estructura del distrito está dominada por la falla regional de cabalgamiento Palanda, la cual define el frente Subandina y las fallas biseladas con tendencia N-S (*La Canela y Nangaritza*) las cuales subdividen el batolito. Las fallas regionales de Palanda y Cosanga definen el límite este del tectonometamorfismo Andino caracterizado por fabricas penetrativas y asociaciones metamórficas. El Cratón Guayanés y la secuencia de cobertura al Este de esta línea exhiben una distribución heterogénea del esfuerzo, caracterizada por la zona de cizalla y falla de cabalgamiento

entre las cuales la deformación ha sido limitada por un suave plegamiento, acompañado por fallamiento en bloques.

El batolito está limitado por fallas hacia el Este (falla El Cóndor) donde esta yuxtapuesto contra los volcánicos Misahualli y los similares lineamientos subparalelos de fallas con dirección N-S continúan hacia el Este tan lejos como el frente Cutucu-Galeras en el lado Este de las sierras Subandina.

Una de las principales características del distrito es la ocurrencia del graben o semi graben con dirección NS como tipifican los cinturones de Nambija y María Elena, donde las rocas de edad pre a sin batolítica son preservadas de techos colgantes parcialmente skarnificada, limitada por fallas. Diques a lo largo de las fallas del graben con edad cretácica media indican que existió una fase tectónica entre el evento colisional de peltetec y el cese de la deposición de las formaciones Napo y Tena coincidentes con la acreción del terreno Piñón y levantamiento de la Cordillera real.

### **3.2 Geología local**

El proyecto "San Carlos" código 695, se encuentra constituido por tres unidades bien definidas las mismas que están referenciadas en base a información 1-100000, de la base geológica del Ecuador en donde se distinguen: Batolito de Zamora, Unidad Piuntza, Depósitos aluviales.

- **Batolito de Zamora.**

De edad Jurásica tardío a medio, comprende una extensión de 200 km de largo y 50 km de ancho, segmentado en tres cuerpos por las fallas de La Canela y Nangaritza con dirección N-S. Su composición es diorítica-granodiorítica, el cual es considerado en gran medida de la corneanización y skarnificación de las rocas de la Unidad Piuntza.

- **Unidad Piuntza.**

De edad Triásica media a superior, se presenta como un techo colgante limitado en el sub-distrito de Cumbaratza del Batolito de Zamora. Litológicamente la Unidad Piuntza comprende, calizas, variedad de lutitas calcáreas, limolitas, flujos volcánicos y brechas de composición andesítica-basáltica. En el cinturón de Nambija la fracción volcánica se incrementa hacia el Norte, difícilmente diferenciada de la Unidad Misahualli con edad jurásica. El contacto metamórfico ha producido corneanas, cuarcitas y localmente skarns con contenido de oro y mármoles.

- **Depósitos aluviales.**

De edad temprana del Cuaternario, son depositaciones de fragmentos de diversos tipos de roca ígnea, sedimentaria y metamórfica, las cuales producto del intemperismo han logrado acumular depósitos de considerable valor económico los cuales son una fuente de riqueza para el sector minero, haciendo a estos placeres de un alto interés económico.

### **3.3 Geología a detalle**

Desde el punto de vista litológico está constituida por un intrusivo (Batolito de Zamora), el cual se lo ubica en varios afloramientos en la mayoría de las quebradas de la zona, tratándose de una roca tipo granítica a granodiorita hornbléndica con cristales de mica blanca, de grano medio a grueso. Existe la presencia de rodados de rocas volcánicas tipo andesita, rocas sedimentarias; pero en definitiva la mayor parte del área está constituida por un intrusivo de grano medio a grueso.

Este depósito se presenta en las planicies aluviales del río Nambija, el cual ha formado meandros heterogéneos, donde se encuentran caracterizados por clastos redondeados de Granito + Feldespato Potásico + pórfido granodiorítico Hornbléndica + Cuarzo diorita con diámetros que van de 2 - 15 cm y presencia de arena y material limoso.

## Capítulo cuatro

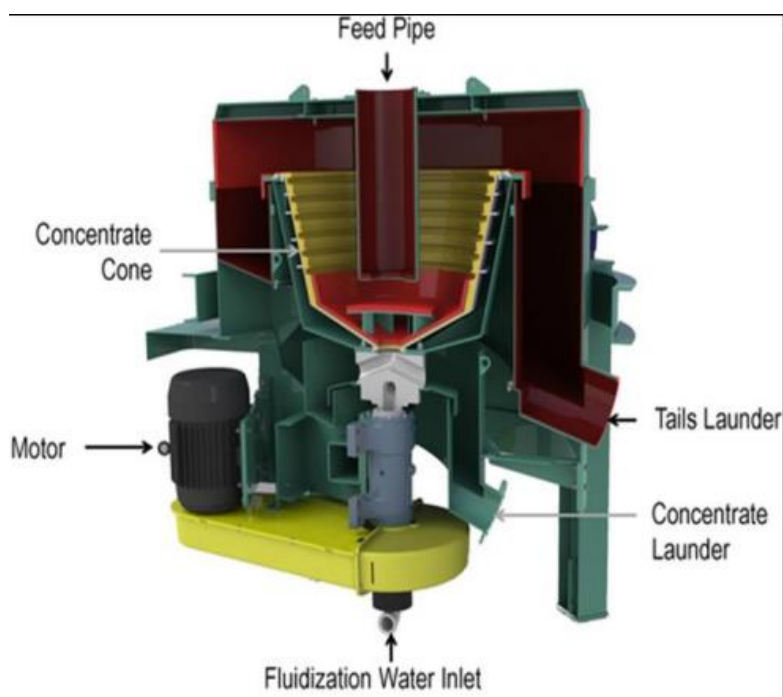
### Método de concentración gravimétrica centrífuga knelson

#### 4.1 Concentrador centrífugo Knelson

La efectividad de separación en el concentrador Knelson se basa en la generación de una fuerza gravitacional 60 veces superior a la fuerza normal de un equipo convencional que juntamente con el proceso de fluidización, permite la recuperación aún partículas microscópicas (Salas et al., 2000).

El concentrador centrífugo Knelson, en la actualidad es uno de los equipos de concentración gravimétrica más usado en la concentración de minerales de oro, ha mostrado una separación con alta eficiencia, posee una elevada capacidad de procesamiento y sus costos de operación y mantención son relativamente bajos. (Medmin, 2000)

Es un equipo que sirve para concentrar minerales pesados por su diferencia de peso específico; Mediante la rotación a gran velocidad se crea una fuerza centrífuga del orden de 60 g, llevando las partículas de material hacia la periferia, donde las partículas mineralógicas de mayor peso tienen tendencia a entrar en los espacios inter-rifles, mientras que las partículas livianas son transportadas hacia la parte superior externa; además se emplea presión de agua (lecho fluidizado) para producir una competencia de fuerzas, el diseño de los equipos permite que sólo los materiales más pesados sean retenidos en la canastilla de concentración. (Miqueles, 2009).

**Imagen3.***Concentrator centrifugo Knelson*

Nota: Adaptado de Consep Engineering Innovation

Esto significa que en el interior del Concentrador Knelson las partículas son sometidas a 60 veces la fuerza de la gravedad para asegurar la recuperación de partículas finas que antes se pensaba eran no recuperables por medios gravimétricos convencionales. En su operación, en principio se inyecta agua en el tazón giratorio de concentración a través de una serie de orificios de fluidización. Luego, se introduce la pulpa por medio de un tubo central vertical estacionario de alimentación.

Una vez que la pulpa llega a la base del tazón, ésta, debido a la fuerza centrífuga, es forzada a desplazarse por la parte exterior, subiendo por la propia pared del tazón, donde las partículas pesadas, una vez que se ha alcanzado la fluidización óptima, son atrapadas entre los rifles, creando así un lecho en el que se produce la concentración y las partículas livianas son descargadas por la parte superior del tazón (García, 1999)

Una desventaja de las centrífugas con agua a inyección es su alta demanda de agua limpia. En las instalaciones de diferentes plantas de beneficio de pequeña minería se demostró que muchas veces resulta muy difícil proveer agua con la cantidad y presión necesaria. Especialmente para alcanzar la presión de agua requerida, muchas veces se tiene que utilizar una bomba, lo cual implica una inversión adicional. Es posible reciclar agua, pero esto requiere de instalaciones adicionales para su purificación (Medmin, 2000).

Se aplica comúnmente como dispositivo primario de recuperación de metales preciosos en circuitos de molienda y plantas de tratamiento de material aluvial. Como promedio, el tamaño de las partículas aptas para este proceso varía entre 30 y 14 mm, dependiendo del tipo y modelo de centrifugadora utilizada.

La recuperación de oro libre puede ser buena bajo las siguientes condiciones:

- Clasificación del tamaño de partículas.
- Alimentación continua.
- Pulpa diluida sin presencia de grumos.
- Presencia de pocos minerales pesados adheridos

En la operación del Knelson, la compactación de la cama se evita por medio del proceso de fluidización. A medida que el agua es inyectada a los anillos, se controla el flujo para alcanzar fluidificación óptima. Partículas de alto peso específico son retenidas en el cono concentrador (Armando, 2006).

Ventajas del concentrador Knelson:

- Recuperación rápida y eficiente a bajo costo
- Operación confiable y sin problemas
- Bajo costo de inversión, operación y mantenimiento
- Operación que no contamina y sin peligro para el medio ambiente
- Total, seguridad del concentrado

- Total, automatización disponible en todos los modelos

El equipo Knelson encuentra su aplicación en el procesamiento de:

- Metales preciosos: oro, platino y plata.
- Metales básicos: cobre.
- Metales nocivos para el medio ambiente: plomo y mercurio.

Este equipo fue desarrollado en Canadá por Byron Knelson, un equipo de alta gravedad, constituye el avance más notable de esta década en lo que ha recuperación gravimétrica del oro se refiere.

- **Parámetros de operación**

- **Presión de agua**

La presión de agua requerida, muchas veces se tiene que utilizar una bomba para lograr obtener los PSI requeridos para la concentración gravimétrica los cual la presión es una fuerza aplicada para poder obtener una mejor concentración de acuerdo a los psi que se vaya aplicar, donde aplicaremos 2 psi para las pruebas de ensayo.

- **Fuerzas G**

Son fuerzas centrífugas que actúan sobre las partículas de especies mineralógicas. La fuerza del agua, ocasionando un arrastre de partículas de mineralógicas permitiendo una mayor eficiencia en la recuperación de partículas finas por efecto de la gravedad.

Fuerza centrífuga es una fuerza ficticia que aparece cuando se describe el movimiento de un cuerpo en un sistema de referencia en rotación, o equivalentemente la fuerza aparente que percibe un observador no inercial que se encuentra en un sistema de referencia rotatorio.

- **Granulometría**

La granulometría es la distribución granulométrica de los diferentes tamaños de partículas de un mineral, esto se expresa en porcentaje porque existe una relación con la partícula retenida en cada malla con el peso total de la muestra seca, la cual se va utilizar para el concentrador Knelson dos tipos de granulometría. El análisis granulométrico tiene como finalidad obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra. Para ello se emplea el vibrotamiz RETSH y una serie de tamices estandarizados ASTM.

#### **4.2 Concentradores centrífugos**

Los concentradores centrífugos constituyen la principal innovación realizada a los implementos de concentración gravimétrica de oro. En un tiempo muy corto, han ganado gran aceptación para la recuperación gravimétrica de oro en minas grandes; frecuentemente en los circuitos de molienda para separar oro libre y evitar sobre molienda y antes de plantas de cianuración o flotación para recuperar el oro grueso.

También existen muchas aplicaciones en plantas industriales en la minería aurífera aluvial. Otra aplicación especial para los concentradores centrífugos es la recuperación del oro como un producto secundario, por ejemplo, en canteras de grava. Todos los concentradores centrífugos operan con el mismo principio: básicamente, un recipiente que rota efectúa la separación gravitacional de la carga en un campo centrífugo.

Los tipos de concentradores centrífugos más utilizados están basados en el mismo principio, pero difieren en su diseño técnico. Se encuentran los concentradores Knelson, Knudsen y Falcon y algunos de fabricación local.

Existen dos tipos principales de centrífugas:

- Centrífugas sin inyección de agua en contracorriente (Knudsen, algunos modelos de Falcon)

- Centrífugas con inyección de agua en contracorriente (Knelson, algunos modelos de Falcon).

Como promedio, el tamaño de las partículas aptas para este proceso varía entre 30 mm y 1-4 mm, dependiendo del tipo y modelo de centrifugadora utilizada.

La recuperación de oro libre puede ser buena bajo las siguientes condiciones:

- Cuando la alimentación está clasificada en rangos de tamaño bien delimitados
- Presencia de pocos minerales pesados acompañantes gruesos.

Las centrífugas ofrecen buena seguridad contra robos y ahorran fuerza de trabajo significativamente (lo cual puede ser una desventaja en la pequeña minería). Con las centrífugas se pueden lograr altos radios de enriquecimiento. Para la posibilidad de fundición directa, pero a menudo se necesita otro equipo más (p.ej. una mesa concentradora). En los circuitos de molienda, los concentradores centrífugos son utilizados efectivamente para recuperar el oro liberado.

Una desventaja de las centrífugas actuales es que este equipo por lo general no trabaja verdaderamente de manera continua, es decir, la operación debe ser periódicamente interrumpida para descargar el concentrado retenido en el lecho del cono del concentrador. Esto implica una paralización en las actividades de aproximadamente 5 minutos y es posible solamente cuando la planta dispone de otra máquina de apoyo. De otra manera, esto causaría pérdidas significativas, debido a que el material tendría que ser desviado durante la descarga del concentrado o se tendría que utilizar otra centrifugadora como "stand-by".

Los intervalos de tiempo para la descarga deben ser determinados experimentalmente. Incrementar el tiempo de operación implica una elevación del factor de enriquecimiento en el concentrado, pero disminuye la recuperación total, porque las partículas de oro fino también se pierden progresivamente durante el lavado.

Recientemente han sido desarrollados los concentradores centrífugos de efusión semicontinua o continua (los nuevos equipos de Falcon y Knelson) pero, hasta el momento, no se encuentran disponibles muchos datos sobre su rendimiento en la práctica.

#### 4.2.1 Concentración centrífuga

Todos los fenómenos y fuerzas que interaccionan en la concentración gravimétrica también actúan en la concentración centrífuga, algunos fenómenos son de mayor importancia que otros. Cuando se desea sedimentar partículas finas, es necesario aumentar la fuerza requerida para vencer la resistencia del fluido, fuerza que es conocida como fuerza centrífuga que obedece a la ecuación.

$$F_c = (m - m')\omega^2 R - F_R = m \frac{\partial V_t}{\partial t}$$

Dónde:

FC = Fuerza Centrífuga

m = Masa de la partícula

m' = Masa del fluido desalojado

w = Velocidad Angular

R = Radio de giro de la partícula

FR = Fuerza de Resistencia del fluido

t = Velocidad tangencial

#### 4.2.2 Principio de concentración gravimétrica.

Partiendo de la ecuación de Stokes, bajo un campo de gravedad la velocidad de sedimentación está relacionada directamente con el cuadrado del tamaño de la partícula, según la siguiente ecuación

$$V_s = \frac{d^2(P_p - P_L)}{18\mu} \cdot g$$

Dónde:

Vs: velocidad de sedimentación

$d$ : diámetro de la partícula.

$\rho_P$ : densidad de la partícula

$\rho_L$ : densidad del líquido.

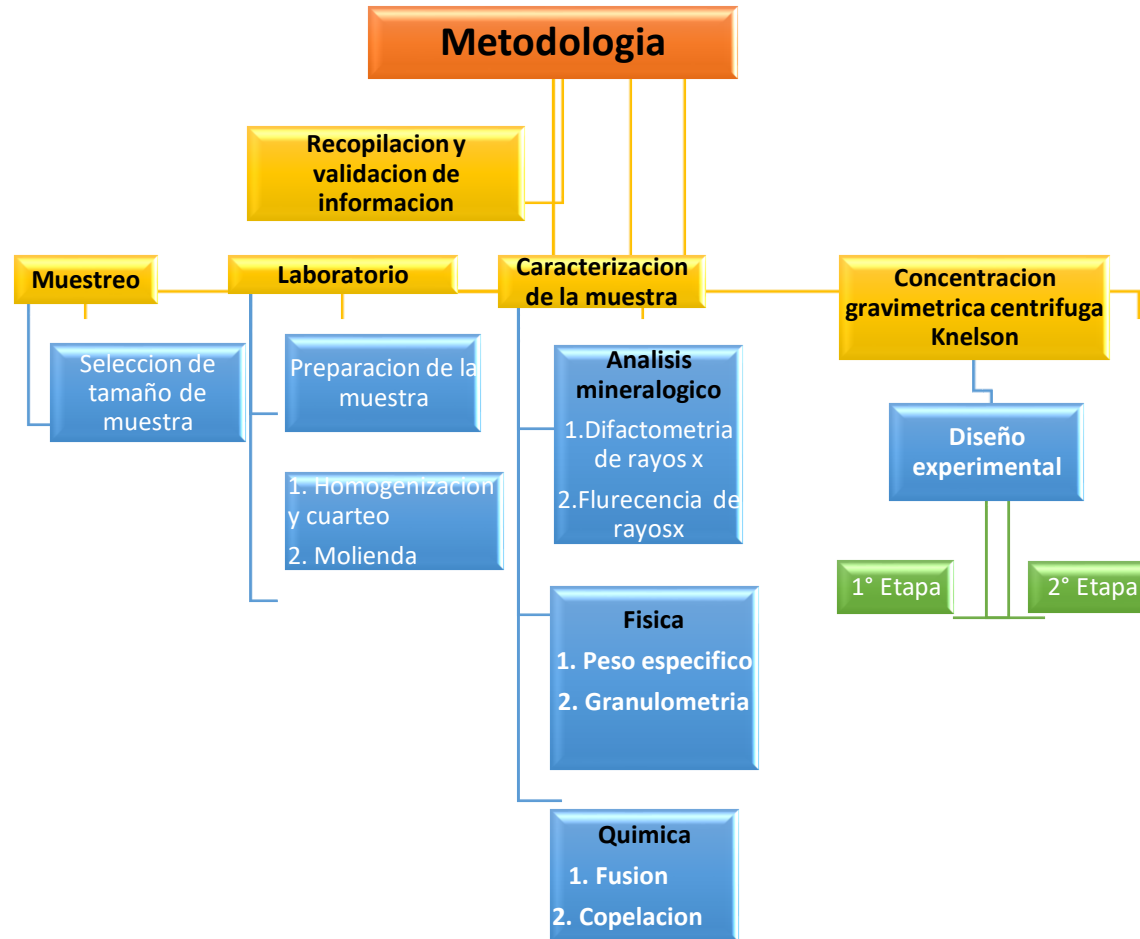
$\mu$ : viscosidad del líquido.

$g$ : aceleración de la gravedad.

De acuerdo con esta ecuación cuando el tamaño de la partícula es pequeño la velocidad de sedimentación es también pequeña. Por lo tanto, en estos casos es necesario hacer uso de una fuerza de separación mayor como es la fuerza centrífuga.

Capítulo cinco  
Metodología

5.1. Flujoograma



## **5.2. Recopilación y validación de información.**

Como paso preliminar al desarrollo de la investigación experimental “Anteproyecto” se realizó una indagación sobre temas referidos a la concentración gravimétrica centrífuga con Knelson, para lograr realizar la concentración del metal de interés del proyecto. La información se la obtuvo mediante investigaciones científicas, tesis sobre temas metalúrgicos, libros de divulgación minera – metalúrgica.

## **5.3. Muestreo**

El proceso de recolección de muestras se llevará a cabo dentro del Distrito Minero Nambija “San Carlos”; se empleará el método de toma de muestras aleatorio y tomando en cuenta que la muestra debe ser representativa.

Se tomará material de las relaveras de una forma aleatoria y con una granulometría fina para realizar la concentración gravimétrica centrífuga con Knelson, se recogerá un aproximado de unos 50 kg de muestra para posteriormente realizar los ensayos y análisis que se llevaran a cabo en el Departamento de Geología y minas de la UTPL.

El material se lo obtuvo dentro de la concesión de la sociedad minera “San Carlos”.

### ***Coordenadas:***

X= 0739418

Y=9561009

Z=856 msnm

**Imagen4.***Recolección de la muestra*

Nota: Fotografías en la toma de muestra del material a trabajar.

**5.4. Preparación de la muestra**

Una vez recolectada la muestra y transportada hacia los laboratorios y antes de proceder con los estudios y análisis previstos realizamos un acondicionamiento previo de la muestra.

Debido a que las muestras se encontraban expuestas al ambiente aluvial es necesario secarlas, para esto empleamos una estufa a una temperatura promedio de 90° por 48 horas.

#### **5.4.1. Homogenización y cuarteo**

La homogenización consiste en mezclar todo el material que se obtuvo del proceso de recolección hasta llegar a obtener una distribución uniforme.

Este proceso lo realizamos sobre una superficie plana donde sea posible esparcir todo el material, lo apilamos en forma cónica de manera que nos permita mezclarlo totalmente sin dejar partes muertas.

Dentro del proceso de cuarteo se busca separar las cantidades adecuadas y representativas de material para cada uno de los ensayos, esto consiste en separar el material y formar una porción circular a la cual la dividimos en cuatro partes y tomamos las dos opuestas, repetimos este proceso hasta obtener la cantidad adecuada.

#### **Imagen5.**

*Homogenización y cuarteo*



Nota: fotografía del cuarteo de la muestra.

#### **5.4.2. Pulverización**

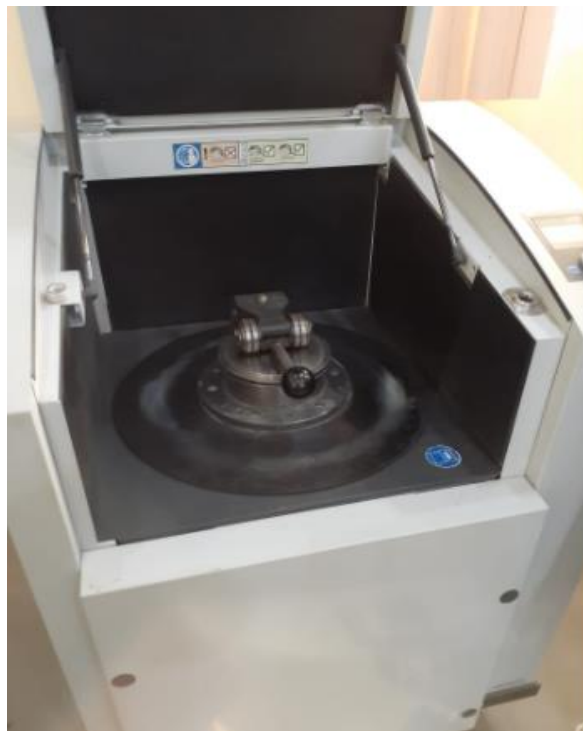
La pulverización del material se realiza para reducir el tamaño de partículas de manera tal que permita hacer los ensayos pertinentes, para esto se usa el equipo Retsch Modelo RS200.

Se procede de la siguiente manera:

- Tomamos una muestra del material que pase el tamiz #10.
- Se esparce en un plástico, cuarteamos el material y tomamos una muestra de 100 gr.
- Se coloca el material en el recipiente para posterior pulverizar.
- Se lo coloca en la máquina pulverizadora, aseguramos e iniciamos el modo de programa manual, que tiene una duración de 3 minutos con una velocidad de 700 rpm.

#### **Imagen6.**

##### *Pulverización*



Nota: Máquina pulverizadora.

## **5.5. Caracterización del mineral**

Esta caracterización permite conocer las propiedades físicas químicas y mineralógicas que presenta el material para comprender su comportamiento y determinar su tratamiento más efectivo.

### **5.5.1. Análisis mineralógico**

#### **5.5.1.1. Difractometría de Rayos x**

La difractometría de rayos X un método netamente ondulatorio que mediante un haz de rayos X incide sobre un átomo, sus electrones son puestos a oscilar alrededor del núcleo como resultado de la perturbación produciendo una dispersión coherente que es precisamente la difracción. Esto nos permite saber detalladamente la mineralogía de un material utilizando el equipo Bruker D8 Eco.

Su proceso es el siguiente:

- Se pulveriza una porción de muestra de entre 50 gr.
- Se deposita el material a analizarse en un tubo de ensayo.
- De la muestra del tubo se toma una pequeña cantidad y se coloca en él porta muestras.
- Colocar la muestra en el equipo.
- Se realiza la interpretación mediante software (EVA).

#### **5.5.1.2. Fluorescencia de rayos x**

La fluorescencia de rayos X es una técnica que nos permite identificar la composición química de un material. Se realiza con una pistola Bruker modelo S1 de fluorescencia de rayos X (Imagen 7).

Su proceso es el siguiente:

- Se pulveriza una porción de muestra, entre 100 gr.
- Se coloca en un recipiente especial, que será colocado en un compartimento en la parte superior de la pistola de rayos X.

- Se configura el equipo con el programa Mining Light Elements.
- Se extraen los datos y se analiza los elementos que se encuentran en la muestra.

### Imagen7.

*Equipo de fluorescencia de rayos x*



Nota: Fotografía de la pistola de Fluorescencia de rayos x.

## **5.5.2. Análisis físico**

### **5.5.2.1. Peso específico**

El peso específico expresa la relación entre el peso de un mineral y el peso de un volumen igual de agua.

- Se limpia el picnómetro de 10ml y se pesa (Peso del picnómetro vacío - P1).
- Se introduce una porción de muestra y se pesa (Peso del picnómetro más muestra - P2).

- Añadimos agua al picnómetro hasta el borde, lo tapamos, limpiamos el exceso y se pesa (Peso del picnómetro más muestra y agua - P4).
- Se desecha la muestra y el agua, se elimina residuos, se llena con agua y se pesa (Peso del picnómetro más agua - P3).
- Finalmente se realizan los cálculos (El ensayo se repite 3 veces con el fin de realizar un análisis comparativo).

Para este análisis realizare el método del picnómetro; que se resume en la siguiente expresión:

$$\gamma^c = \frac{P2 - P1}{(P3 - P1) - (P4 - P2)}$$

P1 → peso picnómetro vacío

P2 → P1+ peso de muestra

P4 → P2 + agua

P3 → P1 + agua

### Imagen8.

*Peso específico (Picnometro)*



Nota: Fotografía tomada en el pesaje del picnómetro.

### 5.5.2.2. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico tiene como finalidad obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra. Para ello se emplea el vibrotamiz RETSH y una serie de tamices estandarizados ASTM.

La serie se detalla: N°10 (2 mm), N°18 (1 mm), N°35 (500  $\mu\text{m}$ ), N°60 (250  $\mu\text{m}$ ), N°120 (125  $\mu\text{m}$ ), N°200 (74  $\mu\text{m}$ ), N°230 (63  $\mu\text{m}$ ), N°325 (44  $\mu\text{m}$ ), N°400 (37  $\mu\text{m}$ ), y N°-400, Fondo.

Una vez que el material retenido está seco se realiza el tamizado por vía seca empleando la serie completa de tamices, éstos se pesan con el material retenido y luego vacíos; con la diferencia obtenemos el peso de la muestra.

La granulometría es la distribución granulométrica de los diferentes tamaños de partículas de un mineral, esto se expresa en porcentaje porque existe una relación con la partícula retenida en cada malla con el peso total de la muestra seca. Para esto se utilizó 250 g de muestra y una malla de corte de abertura determinada.

#### Imagen9.

*Proceso de Granulometría*



Nota: Fotografía realizando granulometría en los tamices.

### **5.5.3. Análisis Químico**

#### **5.5.3.1. Método de ensayo al fuego**

Para desarrollar este ensayo se emplearon dos hornos eléctricos de pruebas; el primero para el proceso fusión con una temperatura máxima de 1200°C y el segundo para el proceso de copelación con una temperatura de 900°C.

##### **❖ Fusión**

- Colocar en el crisol de fundición 30 gr de muestra a analizar previamente pulverizada.
- Adicionar 100 gr de flux, 3gr de harina.
- Ingresar los crisoles etiquetados de manera ordenada al horno de fundición a 1000°C por el tiempo de 60 minutos.
- Sacar los crisoles del horno y verter su carga fundente en las lingoteras.
- Dejar enfriar y posteriormente separar el plomo de la escoria.
- Formar un regulo de plomo.

##### **❖ Copelación**

Del material obtenido en el proceso de fusión procedemos a separar las escorias del regulo de plomo, con ayuda de un martillo procedemos a moldearlo hasta obtener una forma de cubo, se coloca dentro de la copela y se lleva al horno durante aproximadamente 90 min a 900°C o hasta que el plomo se evapore y sea absorbido como PbO por la copela, dando como resultado una perla de oro o dore.

**Imagen10.**

*Proceso de copelacion (Dore)*



Nota: Horno de copelacion y Dore.

**❖ Ataque químico**

- Se limpia y etiqueta los crisoles de porcelana que se utilizarán en el proceso.
- Se diluye agua destilada con ácido nítrico en las siguientes proporciones: 1:7, 1:3 y 1:1 respectivamente.
- En los crisoles etiquetados se coloca los dore laminados, y se ataca con la dilución de ácido colocando entre 5 y 10 ml de ácido en cada crisol.
- Se los somete al calor sobre una plancha calentadora a 90°C por 15 a 20 minutos.
- El indicador de la eliminación de la plata es el cambio de coloración en el doré de color plata a amarillo.
- Finalmente disolver el oro con agua regia, para colocar la solución en balones volumétricos de 10ml donde se va hacer la lectura en ICP para obtener el porcentaje en ppm para luego realizar los cálculos de las leyes de oro.

**Imagen11.**

*Proceso de ataque químico (Digestión)*



Nota: fotografías tomadas por el autor en el proceso de digestión.

## **5.6. Concentración Gravimétrica Centrifuga con Knelson**

### **5.6.1. Molienda**

El proceso de molienda es la última etapa de la reducción de tamaño de partículas para la liberación de minerales con interés económico. Consiste en reducir el tamaño de 2 mm hasta obtener un pasante del 80% a través de la malla #120 y #200 (74  $\mu$ m). Para esta etapa empleamos un molino de bolas Batch de laboratorio (9,8 in x 7,2 in), modelo C560394, accionado por un motor eléctrico de  $\frac{1}{2}$  HP a 80 rpm con carga de bolas de acero.

#### **Parámetros de molienda:**

Peso Muestra: 1000 g.

Volumen de Agua: 1000 ml.

Dilución S/L: 1/1.

Carga de Molienda: 11,448 kg 40% de llenado.

Velocidad Crítica: 70-80 rpm.

**Procedimiento:**

Coloque las esferas de acero dentro del molino, seguido añadiremos a cantidad correspondiente tanto de mineral como de agua, cerraremos a cubierta del molino y lo colocaremos sobre los rodillos y procedemos a encender el equipo. El funcionamiento de este molino se da al girar a una velocidad determinada, las esferas de acero dentro del molino producen un efecto de cascada hacia abajo rompiendo las partículas de mineral, mediante impactos repetidos y continuos. Este proceso se lo llevo a cabo a distintos tiempos de molienda que son para malla #120 un tiempo de 25 min y para la malla #200 un tiempo de 35 min, tomando como referencia la granulometría.

**Imagen12.***Molienda*

Nota: La fotografía muestra la molienda en el molino de bolas.

### 5.6.2. *Diseño Experimental*

El objetivo principal de realizar las pruebas experimentales es la recuperación de partículas de oro libre en material de granulometría fina, respecto a equipos de laboratorio concentrador gravimétrico centrífugo Knelson, se realizó un el diseño experimental en el cual se determinó dos variables donde se clasificaron como independientes la cual tiene valores como fuerzas G y tamaño de grano, otra variable dependiente donde tiene valores como porcentaje de rendimiento de oro y presión de agua los cuales tomamos como valores para realizar el diseño experimental que posteriormente nos servirá para realizar los ensayos centrífugos gravimétricos knelson modelo KC-MD3, consiste en un cono perforado con anillos internos que gira a alta velocidad y su finalidad es separar las partículas de material de acuerdo con su densidad

**Tabla1.**

*Variables dependientes e independientes*

Esquema diseño Experimental	
Variabes	Valores
Independiente	Fuerzas G (FG) Tamaño de Grano(TG)
Dependiente	% Rendimiento de oro recuperado Presión de Agua(PA)

Nota: La tabla nos muestra los factores independientes y dependientes para realizar los ensayos.

Para calcular el número de ensayos que vamos a realizar tomamos en cuenta las variables independientes como dependientes para lo cual tomamos los valores de las variables para hacer un análisis y cálculo de numero de ensayos lo cual nos daría un resultado de 4 ensayos variando las condiciones en ensayos a realizarse.

**Tabla2.**

*Etapas de ensayos a elaborarse para el k Nelson*

Esquema de diseño Experimental				
1° Etapa				
Variables independientes	Nomenclatura	Cantidad	N° de repeticiones	N° de ensayos (Total = Vrb Ind. * N° de Repe )
Tamaño de Grano	TG	2	1	2*1= 2
Valores constantes	Presión de agua (PA) – Fuerzas G (FG)			
2° Etapa				
Fuerzas G	FG	2	1	2*1=2
Valores constantes	Tamaño de grano (TG) – Presión de agua (PA)			

Nota: La tabla nos muestre un diseño de los ensayos que se piensa realizar.

Estas pruebas se realizaron con 2 kg formando una pulpa homogenizada con 4 litros de agua y 60, 90 G de fuerza centrífuga y 1 psi de presión durante 10 a 15 minutos y un concentrador tipo Knelson con un caudal de alimentación manualmente.

### 5.6.2 Procedimiento para realizar la concentración con Knelson

- En primer lugar, se debe acondicionar el lugar poniendo un balde para el relave y un pírex para el concentrado.
- Se enciende el equipo Knelson, se regula el equipo a 1 PSI y las 60 o 90 FG
- Se coloca la pulpa manualmente ya homogenizada en el knelson para lo cual se utilizó 2 kg de material y 4 litros de agua.
- Una vez terminado el proceso se cierran las llaves y el equipo Knelson.

- Obtenido el concentrado y el relave se deja secar para realizar los ensayos al fuego.
- Se repite el mismo procedimiento hasta la segunda etapa.

**Imagen13.**

*Equipo Knelson*



Nota: Fotografía del equipo de knelson de la UTPL.

## Capítulo seis

### Discusión de resultados

#### 6.1. Caracterización del mineral.

##### 6.1.1 *Peso Específico*

Se utilizó el método del picnómetro, dicho método se ensayó tres veces para lograr obtener un promedio determinado de 2,56 g/cm<sup>3</sup> (Tabla3) con un picnómetro de 10 ml a una temperatura ambiente 20°C. Cálculos de peso específico ver Anexo 1.

**Tabla3.**

*Peso específico método del picnómetro*

Peso Específico	
Ensayos	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )
Ensayo 1	2.64
Ensayo 2	2,48
Ensayo3	2,58
Promedio	<b>2,56</b>

Nota: Los cálculos están especificados en Anexo 1 la tabla fue elaborada por el autor.

##### 6.1.2 *Análisis Granulométrico de cabeza*

Análisis realizado luego del cuarteo y el cribado del material, en el que se pudo determinar el D80 del material siendo este igual al 2000  $\mu$ m, y su D50 igual a 800  $\mu$ m, valores que sirven como partida para realizar el análisis de la ley de cabeza y encontrar los tiempos de molienda según las diferentes granulometrías de la malla #120 y #200. Ver cálculos Anexo 3.

**Tabla4.**

*Valores de análisis Granulométrico*

**Análisis granulométrico de cabeza**

D80	2000 $\mu\text{m}$
D50	800 $\mu\text{m}$

Nota: La tabla nos muestra donde quedan nuestros D80 en la Granulometría.

## 6.2 Análisis mineralógico

El análisis mineralógico se realizó mediante difracción de rayos X y fluorescencia de rayos x. Es importante considerar que los valores obtenidos en dos etapas iniciales son aproximados ya que han sido determinados por comparación visual según patrones estándar.

### 6.2.1 Difracción de rayos x

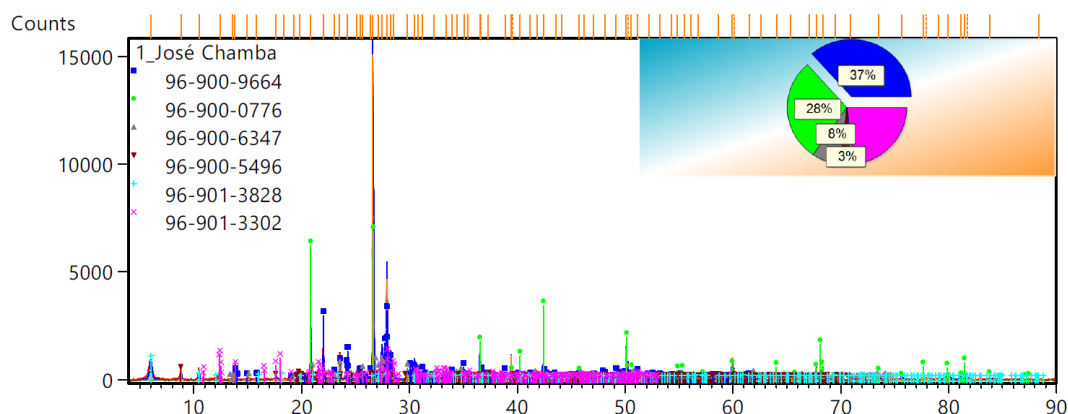
Los resultados arrojados por el equipo de difracción de rayos X sirvieron para realizar un análisis de los datos obtenidos, gracias a esto se comprobó la alta presencia de silicatos como albita, ortoclasa, Phillipsita (tectosilicatos, grupo de la zeolita) una alta presencia de sílice y bajo contenido de minerales de arcilla, así como de sulfuros. En la Tabla 5 se presenta los elementos encontrados con su respectivo porcentaje.

**Tabla5.**

*Valores de análisis DRX*

<b>Difracción de rayos x</b>	
<b>Minerales</b>	<b>Porcentaje %</b>
Albita	<b>37</b>
Cuarzo	<b>28</b>
Ortoclasa	<b>8</b>
Fengita	<b>3</b>
Phillipsita	<b>23</b>

Nota: Minerales determinados por DRX.

**Imagen14.***Difractograma.*

Nota: imagen tomada de los resultados de difracción de rayos x elaborados por el autor

**6.2.2 Fluorescencia de rayos x**

La fluorescencia de rayos X es una técnica que basa en el estudio de emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante un espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil, marca Bruker modelo S1 turbo. Donde nos da el 61% de óxido de silicio como mayoría seguido de 17,3% de óxido de aluminio y 7.79% de óxido de Hierro tomando estas como la mayoría y de mayor importancia. En la Tabla 6 se presenta los elementos encontrados con su respectivo porcentaje.

**Tabla6.**

*Valores en porcentajes de fluorescencia de rayos x*

Fluorescencia de rayos x	
Elementos	%
$SiO_2$	61,5
$AL_2O_3$	17,3
$Fe_2O_3$	7,79
CaO	3,03
$K_2O$	2,73

Nota: Tabla de Fluorescencia de rayos x donde muestra los elementos que existen en la muestra.

### 6.3 Análisis Químico

#### 6.3.1 Ley de cabeza

El análisis para determinar la ley de cabeza se realiza por medio de un análisis químico donde aplicamos fusión, copelación para obtener una perla o Dore, la cual por tener una ley muy baja no se puede aplicar gravimetría para esto realizamos una digestión química con ácido nítrico al 1:7, 1:3 y 1:1 para eliminar alguna aleación de Plata y poder disolver en agua regia, posterior mente leer mediante ICP para poder calcular la ley de cabeza que es de 0.12 gr/ton de oro. Ver anexo 2

**Tabla7.**

*Datos ley de cabeza*

Ley de cabeza	
Metal	Ley de Au (gr/ton)
Oro (Au)	0.12

Nota: La tabla muestra la ley de cabeza determinada por análisis químico.

### 6.4 Ensayos metalúrgicos Knelson

#### 6.4.1 Molienda

Los tiempos de molienda se terminan empíricamente, es decir, ensayando una y otra vez hasta obtener los D80 deseados. Se determinó que se necesita 25 y 35 minutos de molienda para poder llegar a una granulometría adecuada y poder realizar los ensayos en el knelson. Ver cálculos anexo 4.

**Tabla8.**

*Tiempos de molienda*

Tiempos de molienda		
Tiempos	D80 $\mu\text{m}$	Numero de Malla



### 6.4.2 Ensayos Knelson

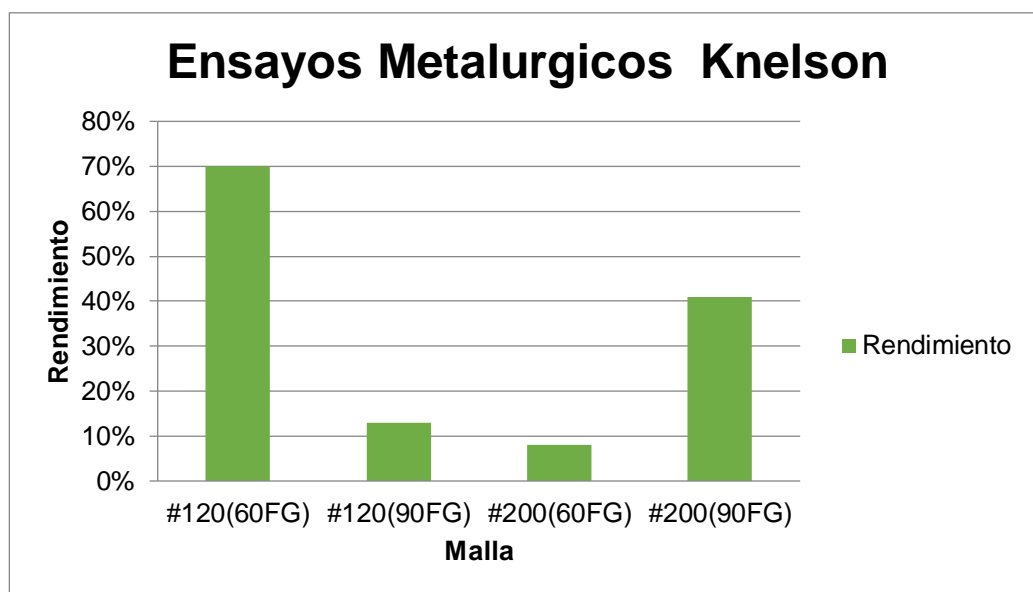
Los parámetros que se emplearon para el desarrollo de los ensayos knelson son 1PSI a 3.5 Lpm de agua, alimentación se la realizo manualmente una relación de agua y muestra a razón de 2:1 respectivamente, 60 fuerzas G y 90 fuerzas G, cambiando progresivamente el tamaño de grano de #120 y # 200 mallas en cada etapa obteniendo así obteniendo los resultados de los ensayos de knelson. Ver Anexo 5.

**Tabla9.**

*Resultados de ensayo metalúrgico Knelson.*

<b>Ensayos metalúrgicos Knelson</b>				
Ensayos	Malla y Fuerzas G	Ley de concentrados(gr/tn)	Rendimiento	Radio de concentración
Ensayo 1	#120(60FG)	2.27	70%	18.91
Ensayo 2	#120(90FG)	0.43	13.33%	3.58
Ensayo 3	#200(60FG)	0.23	7.5%	1.91
Ensayo 4	#200(90FG)	1.21	41%	10.08

Nota: La tabla muestra resultados de concentrados, rendimiento y radio de concentración que dieron como resultados los ensayos en knelson.

**Imagen16.***Grafico estadístico de Rendimiento de los ensayos Knelson*

Nota: Grafico estadístico estableciendo el rendimiento por cada ensayo knelson.

Los resultados que obtuvieron en las dos etapas son los siguientes. En el primera ensayo de knelson, se observa que el rendimiento es de 70% aplicando una granulometría de #120 mallas y 60 fuerzas G mientras que en el segundo ensayo aplicando una granulometría de #120 mallas y 90 fuerzas G, se observa que el rendimiento es de 13.33%. Para la segunda etapa aplicamos una granulometría de #200 mallas y 60 fuerzas G, donde se obtuvo un rendimiento de 7.5% mientras en el cuarto ensayo se obtuvo un rendimiento de 41% aplicando una granulometría de #200 mallas con 90 fuerzas (Tabla 9). Cálculos, balances metalúrgicos y datos de operación Anexo 5.

De acuerdo a los datos obtenidos en la primera etapa y segunda etapa con los ensayos queda demostrado que mientras tengamos una granulometría menor, necesitaremos mayor fuerzas G para lograr una concentración eficiente y así lograr recuperar dicho mineral comprobando que se da una mejore recuperación en el proceso a 120 mallas y con 60 fuerzas G, al obtener 70% de rendimiento y un radio

de concentración de 18.91, siendo considerada como buena la recuperación. Si comparamos con el trabajo investigativo de Valderrama, et.al (2012), que utiliza un concentrador centrífugo Knelson, alcanzan recuperaciones de 89 % y si comparamos con otro trabajo realizado por Rodríguez (1996), donde el equipo de concentración centrífuga utilizado por B. Rodríguez, fue un Knudsen Bowl, cuya recuperación de oro es de 42 %, al comparar con el trabajo realizado, obteniendo el resultado de 70% de recuperación se consideraría muy bueno.

### **6.5 Análisis Económico a nivel de laboratorio utilizando el método Gravimétrico Knelson.**

Para realizar el análisis económico a nivel de laboratorio se tomara en cuenta los costos de operación como luz, agua y operador mediante el mejor ensayo de Knelson, se ha establecido una cantidad de 1 tonelada por día, y como otro factor el precio del oro a nivel mundial en la actualidad que es \$ 59.35, el cual nos servirá para realizar el cálculo y obtener los resultados económicos. Ya calculado los costos de procesamiento en laboratorio es de \$ 1.93 en 2 kg de material y \$ 965 al procesar una tonelada de material; mediante el mejor ensayo nos da como resultado 0.17 mg de Au en 2 kg de material y al procesar una tonelada dará como resultado 0.085 g de Au. Para sacar el precio del Au lo multiplicamos por el precio de Au a nivel mundial y da como resultado \$ 5.04 al procesar una tonelada de material por lo cual observamos que no sería factible aplicar este método porque la ley es muy baja para cubrir gastos de procesamiento; se determina que no es recomendable aplicar el método centrífugo gravimétrico knelson con dicho material.

#### **Tabla10.**

*Cálculo de precio de Au en una Tonelada*

<b>Cálculos de precio del Au en una tonelada</b>	
2kg de material	0.17 mg de Au
Una tonelada de material	85 mg de Au

Gramos de Au en una tonelada	0.085 g de Au
Precio del oro el gramo \$ 59.35	5.044 \$/tn

Nota:

realización de los cálculos de Au en una tonelada de materia se calcula el precio.

**Tabla11.**

*Cálculo del precio de operación de un ensayo en knelson*

<b>Evaluación y cálculo de lo que sería el precio de operación de knelson en laboratorio</b>		
	Precio \$/hora	Material/Kg
Agua ( $m_3$ )	0.28 ctvs.	2kg
Luz (KWH)	0.40 ctvs.	2kg
Operador	1.25 \$	2kg
Precio de operación knelson	1.93	2kg

Nota: Se realizó una evaluación y cálculos de los que sería el precio de operación por knelson.

**Tabla12.**

*Análisis económico a nivel de laboratorio*

<b>Análisis económico a nivel de laboratorio</b>				
	Precio operación \$/2kg	Material 1 ton procesada (kg)	Au gr/ton recuperado	Precio del oro a nivel mundial (\$/g)
<b>Ensayo Knelson</b>	1.93	1000	0.085	59.35 \$
<b>Gastos de operación por día en una tonelada de ensayos en el Knelson</b>	\$ 965		\$ 5.04	

Nota: se realizó un análisis de laboratorio de acuerdo a los gastos económicos que se tendría al realizar un ensayo en knelson.

### Conclusiones

La mineralogía predominante en la muestra extraída de los relaves en el sector San Carlos, se determinó la presencia de silicatos como la albita, ortoclasa, Phillipsita (tectosilicatos, grupo de la zeolita) una alta presencia de sílice y bajo contenido de minerales de arcilla así como de sulfuros

El peso específico muestreado y determinado en el sector San Carlos es de 2.56 gr/cm<sup>3</sup>

La ley de cabeza que se obtuvo de la muestra extraída del sector San Carlos es de 0.12 gr/ton

En el método centrífugo gravimétrico Knelson las mejores condiciones de operación para el material son: tamaño de grano 120 mallas, 1 PSI y 60 fuerzas G, dando como resultado una ley de concentrado de 2.27 g/ton permitiendo un rendimiento de 70% de recuperación y un radio de concentración de 18.91 dando esto como el mejor resultado de los ensayos realizados.

Al realizar el análisis económico a nivel de laboratorio se determinó que el costo estimado para procesar una tonelada de mineral es de \$ 965 y la recuperación en 1 tonelada de material da como resultado 0.085 g de Au, para lo cual se realizó un cálculo con el precio actual del gramo de Au es \$ 59.35 donde da como resultado \$5.04 en la producción en una tonelada de material, se ve claramente que no es rentable por lo que la ley es muy baja para procesar mineral por knelson.

### **Recomendaciones**

Se recomienda ya obtenida la perla o Dore por medio de fusión, copelación realizar una digestión química con agua regia para disolverla y poder leer mediante absorción atómica o ICP porque son leyes muy bajas

Se recomienda tomar el peso exacto de material ya previamente bien homogenizado para que no existan errores y realizar un correcto análisis químico

Se recomienda probar con la malla #90 y #180 ya que en mallas más gruesas se da un mejor resultado además ir variando los parámetros como PSI y Fuerzas G

Se recomienda probar el proceso de flotación para ver cómo funciona esta técnica con el mineral estudiado

## Referencias

- Paladines, A. &. (1996). Zonificación mineralógica del Ecuador. Quito: Laser.
- Paladines, A. &. (2010). Geología y Yacimientos Minerales del Ecuador
- Gobierno Autónomo Descentralizado, S. C. (2012). Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial de la Parroquia San Carlos de las Minas. Zamora.
- Litherland, M. J. (1994). The metamorphic belts of Ecuador.
- Medmin. (2000). Concentración Gravimétrica. Implementación de tecnologías dirigidas a la reducción de impactos ambientales negativos causados por operaciones mineras y adecuación ambiental.
- Valderrama, S. O. (2012). Concentración de oro grueso en concentrador centrífugo Knelson. Revista de la facultad de ingeniería.
- Armando Álvarez q. (2006) "tecnología de la concentración centrífuga".
- Torres, J. (2011). "Evaluación de los Métodos de Concentración Gravimétrica para la Recuperación de oro".
- Komet Resources Limited (2014). EXTENDED GRAVITY RECOVERABLE GOLD (EGRG).
- Laplante, A. R. (1996). Gravity Recovery of gold – An overview of recent developments. Department of Mining, Metals and Materials Engineering
- Valderrama, L., Santander, M., & Ossandon, J. (2012). Recuperación de oro grueso en concentrador centrífugo Knelson. Revista de La Facultad de Ingeniería, 28, 35–41.
- Vidal y otros, (2009). ALTERNATIVE PROCESS FOR METALLURGICAL ARTISANAL GOLD MINING. Consejo Superior de Investigación UNMSM.

## Apéndice

### Apéndice 1: Ensayos del picnómetro.

Para este análisis realizare el método del picnómetro; que se resume en la siguiente expresión:

$$\gamma^c = \frac{P2 - P1}{(P3 - P1) - (P4 - P2)}$$

P1 → peso picnómetro vacío

P2 → P1+ peso de muestra

P4 → P2 + agua

P3 → P1 + agua

#### Ensayo 1:

$$\gamma^c = \frac{23.40gr - 19.70gr}{(29.95gr - 19.70gr) - (32.25gr - 23.40gr)} = 2.64gr/cm^3$$

#### Ensayo 2:

$$\gamma^c = \frac{23.80gr - 19.70gr}{(29.95gr - 19.70gr) - (32.40gr - 23.80gr)} = 2.48gr/cm^3$$

#### Ensayo 3:

$$\gamma^c = \frac{25.45gr - 19.70gr}{(29.95gr - 19.70gr) - (32.25gr - 25.45gr)} = 2.58gr/cm^3$$

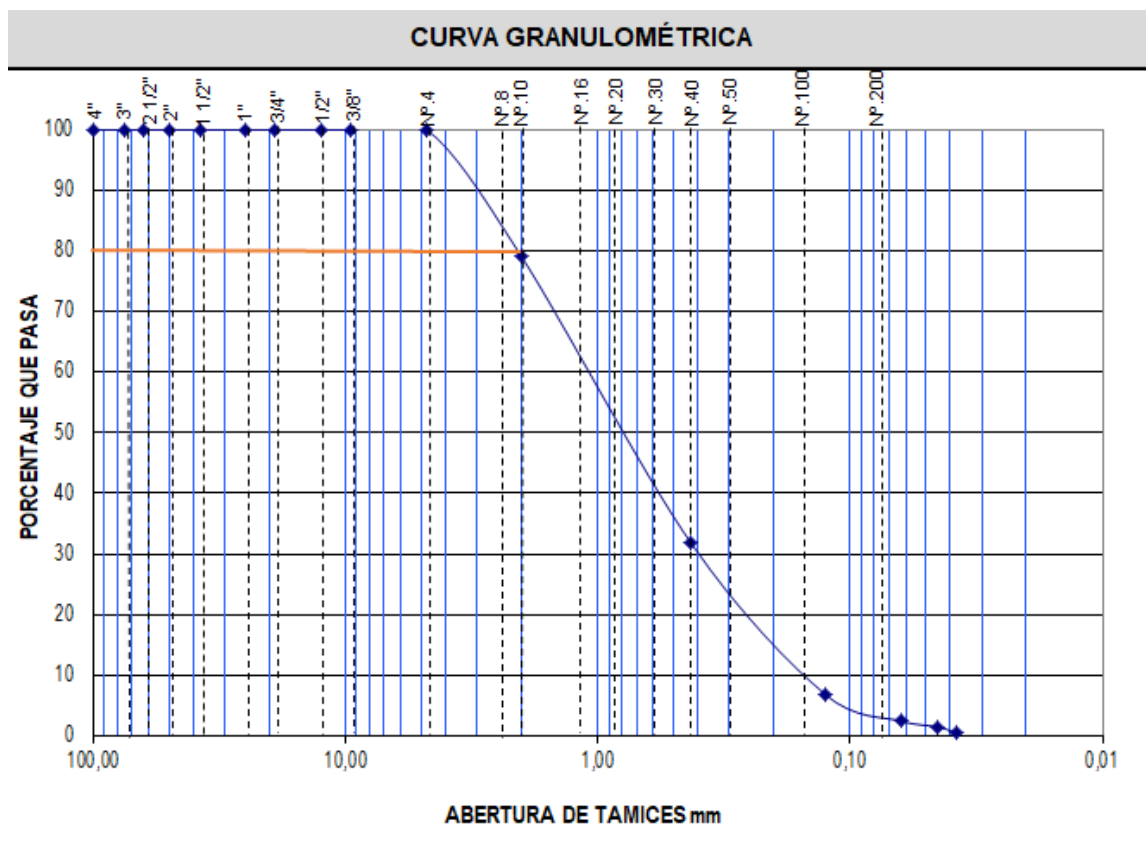
Peso Especifico					
ENSAYOS	P1 (gr)	P2 (gr)	P3 (gr)	P4 (gr)	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )
Ensayo 1	19.70	23.40	29.95	32.25	2.64
Ensayo 2	19.70	23.80	29.95	32.40	2.48
Ensayo 3	19.70	25.45	29.95	32.25	2.58
Promedio Total					2.56

**Apéndice 2: Ley de cabeza.**

<b>Ley de cabeza</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Ley de concentrados (gr/tn)</b>
1	2.27
2	0.43
3	0.23
4	1.21
<b>Ley de cabeza</b>	<b>0.12</b>

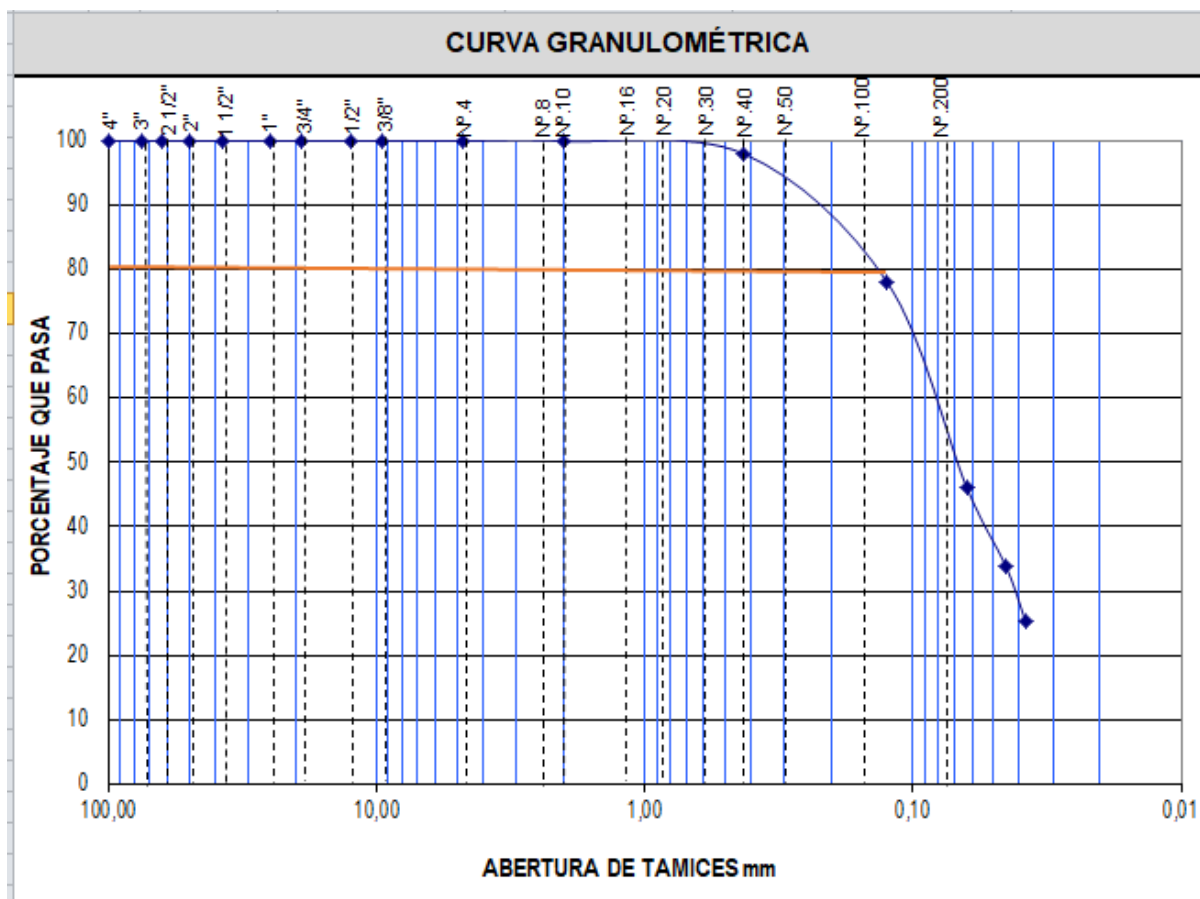
**Apéndice 3: Ensayo de Granulometría de cabeza.**

<b>Granulometría</b>							
<b>No. Tamiz</b>	<b>Diámetro (µm)</b>	<b>W Tamiz (gr)</b>	<b>W Tamiz + Muestra (gr)</b>	<b>Peso Retenido (gr)</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Retenido Acumulado (%)</b>	<b>Material Pasante (%)</b>
10	2000	331,35	383,55	52,20	20,92	20,92	79,08
18	1000	288,50	344,65	56,15	22,50	43,42	56,58
35	425	314,95	376,90	61,95	24,83	68,25	31,75
60	250	238,70	281,80	43,1	17,27	85,52	14,48
120	125	280,70	299,85	19,15	7,67	93,19	6,81
200	75	266,10	272,65	6,55	2,62	95,81	4,19
230	63	274,90	279,20	4,3	1,72	97,53	2,47
325	45	218,00	220,45	2,45	0,98	98,51	1,49
400	38	264,90	267,35	2,45	0,98	99,49	0,51
Fondo	-	358,65	360.309	1,65	0,66	100	0,00
<b>Total</b>				<b>249,45</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>0,00</b>

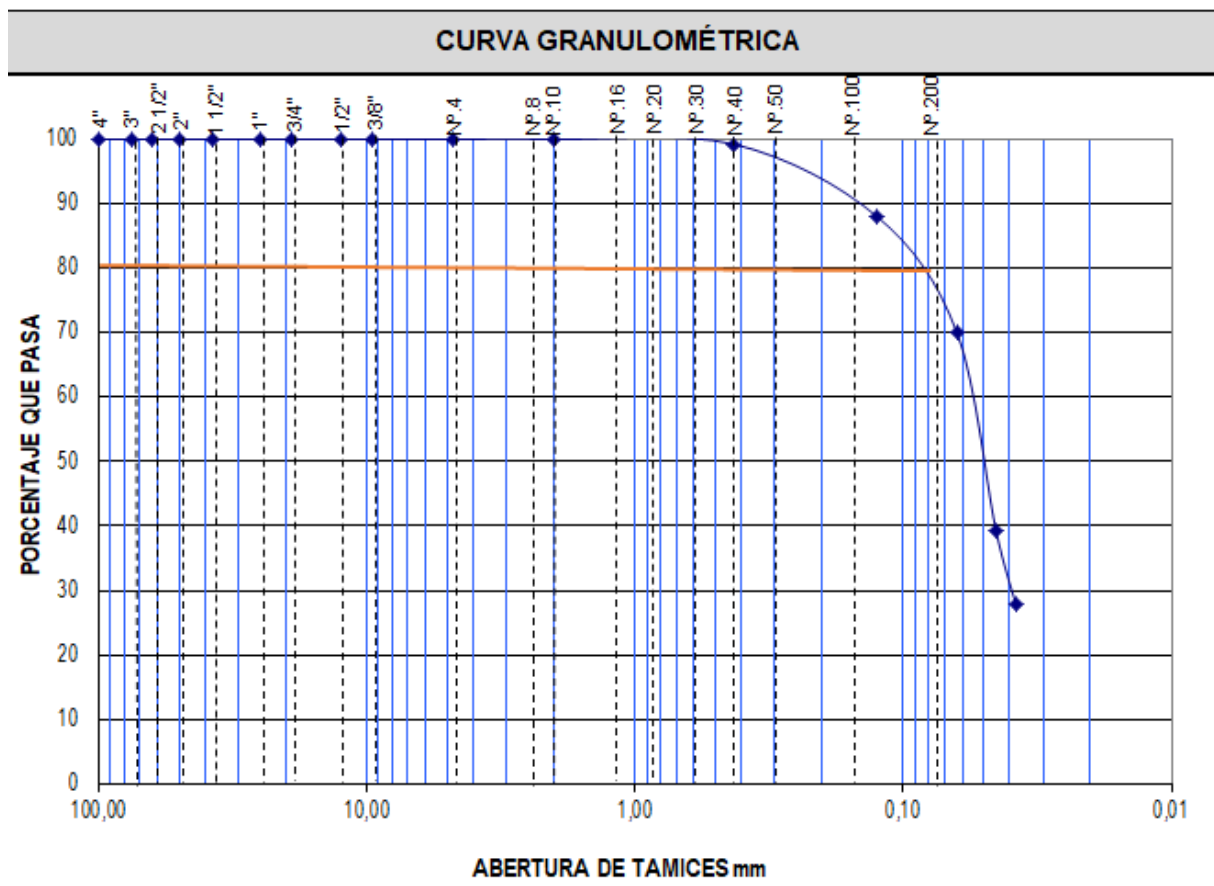


**Apéndice 4: Ensayos de Granulometría de tiempos de molienda.**

Granulometría molienda a 25 min						
No. Tamiz	Diámetro (µm)	W Tamiz (gr)	W Tamiz	Peso Retenido	Peso (%)	Retenido Acumulado
			+ Muestra (gr)	(gr)		(%)
10	2000	331,35	331,45	0,1	0,04	0,04
18	1000	288,5	290,75	2,25	0,9	0,94
35	425	314,95	317,7	2,75	1,1	2,04
60	250	238,70	244,6	5,9	2,36	4,4
120	125	280,70	324,4	43,7	17,48	21,88
200	75	266,10	318,8	52,7	21,08	42,96
230	63	274,90	302,1	27,2	10,88	53,84
325	45	218	248,7	30,7	12,28	66,12
400	38	264,90	286,35	21,45	8,58	74,7
Fondo	-	358,65	421,90	63,25	25,3	100
Total				249,45	100	100



Granulometría molienda a 35 min						
No. Tamiz	Diámetro (μm)	W Tamiz (gr)	W Tamiz	Peso Retenido	Peso (%)	Retenido Acumulado
			+ Muestra (gr)	(gr)		(%)
10	2000	331,35	331,4	0,05	0,02	0,04
18	1000	288,5	289,2	0,7	0,28	0,32
35	425	314,95	316,2	1,25	0,5	0,82
60	250	238,70	245,05	6,35	2,54	3,36
120	125	280,70	303,8	23,1	9,24	12,6
200	75	266,10	308,25	42,15	16,86	29,46
230	63	274,90	320,85	45,95	18,38	47,84
325	45	218	250,75	32,75	13,1	60,94
400	38	264,90	293	28,1	11,24	72,18
Fondo	-	358,65	428,10	69,45	27,78	99,96
Total				249,85	100	100



**Apéndice 5. Datos y parámetros de operación, Balances metalúrgicos, calculo rendimiento y radio de concentración.**

### ENSAYO 1 GRAVIMÉTRICO CENTRÍFUGO CON KNELSON

#### Desarrollo de cálculos

#### Condiciones o Parámetros de Operación

- Fuerzas G 60
- Presión de fluidización 1 psi
- Tamaño de grano 120 mallas

#### Datos experimentales del proceso

- Alimentación: Peso 2 Kg
- Entrada Ley Au 0.12 mg/kg
- Concentrado: Peso 0.075 Kg

- Ley Au 2.27 mg/kg
- Relave:           Peso 1.91kg
- Ley Au 0.045 mg/kg

### **Balance Metalúrgico**

Entrada = Concentrado + Relave

- Entrada o alimentación (E):

$$2\text{Kg} \cdot 0.12\text{mg/kg} = 0.24 \text{ mg Au}$$

- Concentrado (C):

$$0.075\text{kg} \cdot 2.27\text{mg/kg} = 0.17 \text{ mg Au}$$

- Relave (R):

$$1.91\text{kg} \cdot 0.045\text{mg/kg} = 0.085 \text{ mg Au}$$

- $E=C+R$

$$0.24 \text{ mg} = 0.17\text{mg} + 0.085\text{mg}$$

$$0,24 \text{ mg} = 0.25 \text{ mg}$$

### **Rendimiento (%)**

$$\text{Rendimiento} = (\text{concentrado mg Au} / \text{entrada mg Au}) \cdot 100$$

$$\text{Rendimiento} = (0.17 \text{ mg Au} / 0.24 \text{ mg Au}) \cdot 100 = 70 \%$$

### **Radio de Concentración**

RC = Ley del concentrado/ Ley de entrada

$$\text{RC} = 2.27/0.12$$

$$\text{RC} = 18,91$$

## ENSAYO 2 GRAVIMÉTRICO CENTRÍFUGO CON KNELSON

### Desarrollo de cálculos

#### Condiciones o Parámetros de Operación

- Fuerzas G 90
- Presión de fluidización 1 psi
- Tamaño de grano 120 mallas

#### Datos experimentales del proceso

- Alimentación: Peso 2 Kg
- Entrada Ley Au 0.12 mg/kg
- Concentrado: Peso 0.073 Kg
- Ley Au 0.43mg/kg
- Relave: Peso 1.91kg
- Ley Au 0.094 mg/kg

#### Balance Metalúrgico

Entrada = Concentrado + Relave

- Entrada o alimentación (E):

$$2\text{Kg} \cdot 0.12\text{mg/kg} = 0.24 \text{ mg Au}$$

- Concentrado (C):

$$0.073\text{kg} \cdot 0.43\text{mg/kg} = 0.032 \text{ mg Au}$$

- Relave (R):

$$1.91\text{kg} \cdot 0.094\text{mg/kg} = 0.18 \text{ mg Au}$$

- $E=C+R$

$$0.24 \text{ mg} = 0.032\text{mg} + 0.18\text{mg}$$

0,24 mg = 0.21 mg

### **Rendimiento (%)**

Rendimiento = (concentrado mg Au/entrada mg Au) \* 100

Rendimiento = (0.032 mg Au/0.24 mg Au) \* 100 = 13 %

### **Radio de Concentración**

RC = Ley del concentrado/ Ley de entrada

RC = 0.43/0.12

RC = 3.58

## **ENSAYO 3 GRAVIMÉTRICO CENTRÍFUGO CON KNELSON**

### **Desarrollo de cálculos**

#### **Condiciones o Parámetros de Operación**

- Fuerzas G 60
- Presión de fluidización 1 psi
- Tamaño de grano 200 mallas

#### **Datos experimentales del proceso**

- Alimentación: Peso 1.7 Kg
- Entrada Ley Au 0.12 mg/kg
- Concentrado: Peso 0.064 Kg
- Ley Au 0.23mg/kg
- Relave: Peso 1.62kg
- Ley Au 0.12 mg/kg

### **Balance Metalúrgico**

Entrada = Concentrado + Relave

- Entrada o alimentación (E):

$$1.7\text{Kg} \cdot 0.12\text{mg/kg} = 0.20\text{mg Au}$$

- Concentrado (C):

$$0.064\text{kg} \cdot 0.23\text{mg/kg} = 0.015\text{ mg Au}$$

- Relave (R):

$$1.62\text{kg} \cdot 0.12\text{mg/kg} = 0.19\text{ mg Au}$$

- $E=C+R$

$$0.20\text{ mg} = 0.015\text{mg} + 0.19\text{mg}$$

$$0.20\text{ mg} = 0.20\text{ mg}$$

### **Rendimiento (%)**

$$\text{Rendimiento} = (\text{concentrado mg Au} / \text{entrada mg Au}) \cdot 100$$

$$\text{Rendimiento} = (0.015\text{ mg Au} / 0.20\text{ mg Au}) \cdot 100 = 7.5\%$$

### **Radio de Concentración**

$$\text{RC} = \text{Ley del concentrado} / \text{Ley de entrada}$$

$$\text{RC} = 0.23 / 0.12$$

$$\text{RC} = 1.91$$

## **ENSAYO 4 GRAVIMÉTRICO CENTRÍFUGO CON KNELSON**

### **Desarrollo de cálculos**

#### **Condiciones o Parámetros de Operación**

- Fuerzas G 90
- Presión de fluidización 1 psi

- Tamaño de grano 200 mallas

### Datos experimentales del proceso

- Alimentación: Peso 1.7 Kg
- Entrada Ley Au 0.12 mg/kg
- Concentrado: Peso 0.068 Kg
- Ley Au 1.21mg/kg
- Relave: Peso 1.60kg
- Ley Au 0.0.79 mg/kg

### Balance Metalúrgico

Entrada = Concentrado + Relave

- Entrada o alimentación (E):

$$1.7\text{Kg} \cdot 0.12\text{mg/kg} = 0.20\text{mg Au}$$

- Concentrado (C):

$$0.068\text{kg} \cdot 1.21\text{mg/kg} = 0.082 \text{ mg Au}$$

- Relave (R):

$$1.60\text{kg} \cdot 0.079\text{mg/kg} = 0.12 \text{ mg Au}$$

- $E=C+R$

$$0.20 \text{ mg} = 0.082\text{mg} + 0.12\text{mg}$$

$$0.20 \text{ mg} = 0.20 \text{ mg}$$

### Rendimiento (%)

Rendimiento = (concentrado mg Au/entrada mg Au) \*100

$$\text{Rendimiento} = (0.082\text{mg Au}/0.20 \text{ mg Au} ) * 100 = 41 \%$$

**Radio de Concentración**

RC = Ley del concentrado/ Ley de entrada

RC = 1.21/0.12

RC = 10.08