



FACULTAD DE METALURGIA y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA-QUÍMICA

Propuesta del flujo tecnológico para el tratamiento de oro de las colas finas del depósito de Aguas Claras

Trabajo de Diploma en opción al título de
Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Elisa María Reus Sánchez

Moa 2023



FACULTAD DE METALURGIA y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA-QUÍMICA

Propuesta del flujo tecnológico para el tratamiento de oro de las colas finas del depósito de Aguas Claras

Trabajo de Diploma en opción al título de
Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Autor: Elisa María Reus Sánchez

Tutores: Dr.C.Eulícer Fernández Maresma

Ing.Damián Moisés Sombert Rosell

Moa 2023

Declaración de autoridad:

Yo: Elisa María Reus Sánchez

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, la cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Elisa María Reus Sánchez

Dr.C Eulícer Fernández Maresma

Ing.Damián Moisés Sombert Rosell

Pensamiento

“Tu meta más difícil, puede ser tu mayor triunfo”

Autor: Josh McDowell

Dedicatoria

Le dedico mi trabajo, mi esfuerzo y todos mis desvelos a la persona más importante de mi vida, por ser mi mayor apoyo, mi confidente, mi amiga, por ser incondicional y depositar toda la confianza en mí.

A mi mamá Enelis Sánchez Romero.

Agradecimientos:

A mi madre y mi padre Enelis y Reynaldo por todo el apoyo que me brindaron que son realmente los merecedores de todo mi esfuerzo y dedicación.

A familia, en especial a mis sobrinos y a mis hermanos Zailin y Reynelis, por ser muy importantes para mí.

A todos mis amigos, a las tías del comedor, compañeros de cuarto y de aula ("La Funeraria") que realmente me brindaron su apoyo incondicional y estuvieron a mi lado en todos estos años.

A mis tutores Dr.C Eulícer Fernández Maresma y el Ing. Damián Moisés Sombert Rosell, por haber sido la fuente donde surgió este trabajo y por la confianza depositada en mí para la realización del mismo.

Por último, pero no menos importante quiero agradecerme, por confiar en mí, por trabajar duro y siempre creer que llegaría a obtener todas las metas que quiera en la vida.

A todos ellos, muchas Gracias

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo proponer un flujo tecnológico para la recuperación de Oro de las colas finas del depósito de "Aguas Claras" por medio de concentradores centrífugos Knelson, por diversos problemas las muestras tomadas se realizaron en el yacimiento Oro Barita, donde se determinó la diversidad de investigaciones para la recuperación de oro dando paso a la nuestra, se determinó la eficiencia del proceso donde se obtuvo solo un 18.04 % y una ley de Oro de 22,3 (g/t), lo cual significa que el Oro no es recuperable eficientemente por gravimetría y por tanto no se justifica en la muestra estudiada, demostrando que el proceso fue poco factible. Quedaron definidos aspectos relacionados con los tipos de concentradores centrífugos. Se fundamentaron las características del concentrador centrífugo Knelson, y las generalidades de la producción más limpia en la concentración gravimétrica.

Palabras Claves

Concentrador centrífugo, concentración gravimétrica.

Abstract

This work aims to propose a technological flow for the recovery of Gold from the fine tails of the "Aguas Claras" deposit by means of Knelson centrifugal concentrators, due to various problems the samples taken were made in the "Oro Barita" deposit, where the diversity of investigations for the recovery of gold was determined, giving way to ours, the efficiency of the process was determined where only 18,04 % was obtained a gold grade of 22,3 (g/t), which means that Gold is not efficiently recoverable by gravimetry and therefore is not justified in the sample studied, demonstrating that the process was not very feasible. Aspects related to the types of centrifugal concentrators were defined. The characteristics of the Knelson centrifugal concentrator and the generalities of cleaner production were based on gravimetric concentration.

Keywords

Centrifugal concentrator, gravimetric concentration.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Marco Teórico Conceptual	3
1.1. Estado del Arte.....	3
1.2. Mineral de oro	5
1.3. Generalidades de la concentración por gravedad	6
□ Por medio de la densidad	6
□ Mediante la estratificación	7
□ Mediante película fluyente	7
□ Mediante la acción de Sacudimiento	7
1.4. Tipos de equipos concentradores centrífugos:	7
1.4.1. Centrífugas de lecho sedimentado	8
1.4.2. Centrifugador chino	9
1.4.3. Centrifugador gekko	10
1.5. Centrífugas de lecho fluidizado	11
1.5.1. Concentrador centrifugo Falcón	12
1. Sus principales características son:	14
2. Desde un punto de vista general, las principales ventajas que ofrecen estos equipos son:.....	14
1.5.2. Concentrador centrifugo Knelson	14
1. Ventajas del concentrador Knelson:	16
2. El equipo Knelson encuentra su aplicación en el procesamiento de:	16
1.5.3. Centrífugas de lecho fluidizado pulsante	17
1. Mesas concentradoras –vibratorias.....	17
2. Equipo jigs	18
1.6. Tecnologías limpias aplicadas a la recuperación de oro	20
2. Producción más limpia en la concentración gravimétrica	22

1.7. Definición de términos.....	23
a. Minerales de Oro	23
b. Molino de bolas	23
c. Concentración gravimétrica del oro	23
d. Concentradores centrífugos	23
e. Concentrador centrífugo Knelson	23
f. Concentrador Falcón	24
Conclusiones parciales	25
Capítulo 2. Materiales y Métodos	26
2.1. Generalidades del concentrador Knelson	26
2.1.1. Los concentradores Knelson ofrecen:.....	27
2.1.2. Funcionamiento de un concentrador Knelson.....	27
2.1.3. Procedimiento de operación del concentrador Knelson	28
2.2. Caracterización química y mineralógica de las muestras estudiadas.....	28
2.3. Otros materiales empleados en el estudio fueron:	30
2.4. Métodos en los ensayos metalúrgicos.	33
Conclusiones parciales.....	36
Capítulo 3. Resultados y discusión.....	37
3.1. PRUEBAS GRAVIMETRICAS.....	37
3.2. Pruebas en Knelson.	37
3.2.1. Los parámetros operacionales establecidos fueron los siguientes:	38
3.2.2. Recursos Necesarios.	38
3.3. Caracterización química de las muestras tecnológicas estudiadas.....	38
3.4. Resultados de las pruebas hidrogravimétricas con empleo de la técnica del..	43
Conclusiones Parciales	45
Conclusiones Generales	46
RECOMENDACIONES.....	47

Referencias Bibliográficas	48
Anexos	50

Introducción

En los últimos años se han reevaluado los procesos de concentración gravitacional, principalmente por la simplicidad de los procesos gravimétricos y el impacto producido por los procesos de concentración gravitacional, que es considerablemente menor en comparación a otros procesos, debido a la ausencia de productos químicos contaminantes. La separación de minerales de tamaños más gruesos tan pronto como se liberan también tienen significativas ventajas para las etapas posteriores del tratamiento, debido a la disminución del área superficial, desaguado más eficiente y la ausencia de reactivos adheridos que puedan interferir con otro procesamiento (M. Maggi, C. Vega, 2008; A. Mella, J. Acevedo, 1987).

El oro se encuentra en la naturaleza con muy pocas excepciones como metal nativo, se presenta en filones de rocas auríferas, asociado a otros metales y en forma de polvo o de gránulos redondeados o achatados conocidos como pepitas, en depósitos de arena y en lechos fluviales (N. Arredondo, 2007).

La densidad elevada del oro $19,3 \text{ kg/m}^3$, hace posible aplicar tratamientos basados en la concentración gravitacional (J. Ossandon, 2011).

El concentrador centrífugo Knelson, usado en la concentración de minerales de oro, ha mostrado ser un buen equipo porque efectúa una separación con alta eficiencia, posee una elevada capacidad de procesamiento y sus costos de operación y mantención son relativamente bajos (L. Valderrama, 2003).

Conociendo la existencia de varios métodos empleados para la concentración centrífuga del oro en minerales este trabajo plantea como:

Problema de la investigación:

La necesidad de proponer un flujo tecnológico para la recuperación de Oro de las colas finas del depósito de "Aguas Claras" por medio de concentradores centrífugos Knelson.

Objetivo General: Proponer un flujo tecnológico para la recuperación de Oro de las colas finas del depósito de "Aguas Claras" por medio de concentradores centrífugos Knelson.

Objetivos Específicos:

- Determinar el estado de arte.
- Determinar las características de los equipos que intervienen en el flujo tecnológico.
- Definir grado de viabilidad del proceso.

Hipótesis: Si se conocen las características de los concentradores centrífugos Knelson, entonces se podrá proponer un flujo tecnológico que permita la recuperación de Oro de las colas finas del depósito de "Aguas Claras".

Capítulo 1. Marco Teórico Conceptual

En el presente capítulo se realiza un análisis sobre los diferentes aspectos que se encuentran relacionados con la recuperación de Oro por medio de concentradores centrífugos Knelson, con el objetivo de disponer de los elementos necesarios y de las tendencias actuales para el desarrollo del trabajo. Se expone el estado del arte, la conceptualización y consideraciones teóricas sobre los materiales en cuestión, su importancia económica y tecnológica.

1.1. Estado del Arte.

De acuerdo a las investigaciones realizadas, se observa lo siguiente:

Algunos investigadores desde hace varios años han realizado estudios para la recuperación del Oro, mediante las diferentes técnicas:

Según Villachica (2010) la muestra de estudio es un mineral refractario con una ley promedio de 19,31 g/t proporcionado por los mineros artesanales de la zona y procedente de Yangas, provincia de Canta, departamento de Lima. La caracterización mineralógica de la muestra arroja la presencia de los siguientes minerales: Oro, Calcopirita, Covelita, Calcosita, Esfalerita, Pirita, Arsenopirita, Magnetita, Hematita, Goethita, Rutilo y gangas.

Los minerales que se encuentran en mayor volumen son las gangas, pirita y calcopirita, encontramos partículas entrelazadas de Oro con calcopirita y pirita, siendo el tamaño más grande de oro de 17 μ . En la primera etapa se efectuaron pruebas metalúrgicas con el concentrador centrífugo Knelson con 5 kg de muestra, fuerza de gravedad de 60 g y presión de agua de 20 684,3 Pa, para distintas granulometrías como: 52,25 %, 60,66 %, 67,13 % y 74,64 % para (- 200 mm) de

mallas. Los balances metalúrgicos indican que la mejor prueba seleccionada es con una granulometría de 67,13 % para (- 200 mm) de mallas, obteniéndose 300,20 g/t de concentrado, 33,66 % de recuperación y 51,59 de radio de concentración.

L. Valderrama, M. Santander, J. Ossandon, D. Olguín; 28 (2003), realizado con un concentrador centrífugo Knelson. Los resultados de las pruebas realizadas muestran que se puede obtener concentrado con leyes de $304,2 \text{ gt}^{-1}$ y recuperaciones de 80,9 %. Los análisis granulométricos de las muestras indican que, al disminuir la granulometría del mineral, aumenta la ley de Oro en el concentrado y la recuperación. También se analizó el efecto de la presión de agua, estableciéndose que un aumento de la contrapresión produce una disminución en la ley de Oro y en la recuperación.

Según Torres (2011) se realiza la explotación aurífera a partir de los lavaderos donde el porcentaje de recuperación del Oro es muy bajo, que está entre un rango de 40 y 50 % perdiéndose aproximadamente el 50 % durante el lavado, clarificación, bateado, y amalgamado debido a las malas prácticas y técnicas aplicadas en la recuperación de Oro y deficiencias en equipos. El límite superior del tamaño de partículas minerales tratadas en las mesas vibratorias es de aproximadamente 2 a 3 mm mientras que el tamaño mínimo 7 de las partículas que se pueden concentrar en estos equipamientos es del orden de 75 micrones.

Las variables operacionales son las siguientes: inclinación de la mesa, porcentaje de sólidos de la pulpa alimentada, flujo de agua de lavado, posición de los cortadores de productos, frecuencia de vibración de la mesa y longitud del desplazamiento de la superficie de la mesa al vibrar. Los límites granulométricos de los minerales pesados contenidos en la pulpa en los espirales deben ser de 8 mallas hasta 200 mm de mallas, disminuye para granulometrías inferiores a 200 mm de mallas. Por lo cual los

productos obtenidos (concentrado, medios y relaves), son separados al final del canal mediante unas cuchillas ajustables, lo cual simplifica notoriamente el control y operación del equipo.

Según Saúl (2013) en “Estudio de pre factibilidad para la instalación de una planta gravimétrica para la concentración de Oro aluvial en Tingo María” para el proyecto minero Davis SAC que inició su etapa de pre inversión en el año 2011, cateo, exploración. En la actualidad viene realizando estudios de inversión como es el caso de este estudio de pre factibilidad iniciando en agosto del 2012 con un plazo de 6 meses, la siguiente fase es la etapa de operación, iniciando en marzo del 2013. Las resoluciones de los objetivos dieron como resultado que el proyecto es factible en un 30 % con una producción mínima de 1 000 m³ día, con ley de corte de 0,22 g/m³ de Au y 1 130,00 US\$ la onza, por debajo de estos parámetros el proyecto no es factible.

1.2. Mineral de oro

El Oro, como metal precioso ha concitado el interés humano porque este metal ha sido empleado principalmente con fines decorativos y monetarios (Martin, 2014).

El Oro se presenta en la naturaleza en estado nativo y combinado con otros elementos metálicos. El Oro nativo generalmente está aleado con plata, la cual puede alcanzar hasta un 39 %; igualmente, contiene a menudo pequeñas cantidades de cobre y hierro y a veces plomo, bismuto y mercurio (Martin, 2014).

Este metal es susceptible de existir en cercanías geológicas relativamente variadas (rocas sedimentarias, vetas intra plutónicas o peri plutónica). El Oro es químicamente inerte en ambientes naturales y es poco afectado durante el intemperismo y descomposición de la roca que lo contiene (Martin, 2014).

1.3. Generalidades de la concentración por gravedad

La concentración por gravimetría es la más simple y económica de todos los métodos de procesamiento de minerales y permite la recuperación de valores en un rango de tamaño bastante amplio, desde un tamaño grueso como 500 mm hasta los más finos como 5 micrones, donde las partículas de mineral son separadas debido a su diferencia de densidad. Cuanto mayor es la diferencia en la densidad de dos minerales componentes de una mena, mayor será la facilidad con que se efectúe la separación (Clifoord, 1999).

En la concentración centrífugo ocurre distintos movimientos de las partículas y esta es causada por la gravedad y se obtendrá una entrada y una salida de producto. Los equipos y maquinarias de concentración por gravedad son divididos en cuatro grandes grupos, cada uno de estos utilizan principios de separación diferentes. El mecanismo que involucra la concentración por gravedad utiliza la densidad de un fluido o pulpa y la fuerza gravitacional para separar las partículas en dos productos, el liviano y el pesado (Armando, 2006).

❖ Por medio de la densidad

Ajustando la densidad de la pulpa, por variación de la cantidad de sólidos presente en una operación, puede modificarse el punto de corte final (en términos de densidad) entre los dos productos. La separación se lleva a cabo entonces por sedimentación impedida (Armando, 2006).

❖ **Mediante la estratificación**

Las estratificaciones de las partículas de acuerdo a su densidad son llevadas a cabo generalmente en equipos denominados como jigs (Burt, 1984).

❖ **Mediante película fluyente**

El proceso de concentración por corriente laminar de agua consiste en dejar arrastrar por el agua una carga de mineral sobre una superficie inclinada, donde las partículas más livianas son empujadas por la lámina de agua a mayor velocidad que las partículas más pesadas, obteniéndose así dos o más productos (concentrados, mixtos y colas) de acuerdo a su densidad, tamaño y forma (planos inclinados). (Cano, 1991).

❖ **Mediante la acción de Sacudimiento**

El efecto de la fuerza centrífuga generada por la configuración del equipo. Algunas máquinas de este grupo cuentan con un movimiento de vaivén (mesas de cinta) y otras, además tienen rifles en la superficie plana (mesas concentradoras) que ayudan en la operación de concentración (Armando, 2006).

1.4. Tipos de equipos concentradores centrífugos:

Desde el punto de vista de su modalidad de trabajo en la industria en el campo de procesamiento de minerales, los equipos de concentración gravimétrica por centrifugación se agrupan en tres tipos Salas et al. (2000):

- Centrífugas de lecho sedimentado (centrífuga china, centrífuga Gekko).
- Centrífugas de lecho fluidizado (Knelson, Falcon, y otros).

- Centrífugas de lecho fluidizado pulsante (Jig Kelsey, concentrador MGS).

1.4.1. Centrífugas de lecho sedimentado

Para la concentración gravimétrica centrífuga se requiere que el lecho o cama donde se acumularán las partículas pesadas esté sometido a la acción de un campo centrífugo cuya aceleración supere varias veces la aceleración de la gravedad. Cuanta más alta sea esta aceleración mayor serán las posibilidades de obtener altas recuperaciones o podrán concentrarse partículas mucho más finas que normalmente son imposibles de recuperar en la gravimetría tradicional, Salas (2000). Cuando se obliga a una pulpa a desviarse de una trayectoria de flujo rectilíneo que está en curso mediante la acción de una fuerza o un cambio del perfil del canal que conduce la pulpa, se genera una fuerza centrífuga que actúa sobre cada uno de los componentes de la pulpa, de acuerdo con la siguiente expresión, Salas (2000).

La posición de esa zona neutra constituye un factor importante para los resultados de funcionamiento de la centrífuga. Cuando la zona neutra está cerca del centro de la centrífuga, el componente más ligero está expuesto al efecto de una pequeña fuerza centrífuga, mientras que el más denso estará sometido a una fuerza centrífuga mayor donde se demuestra en la figura 1 (Salas, 2000).

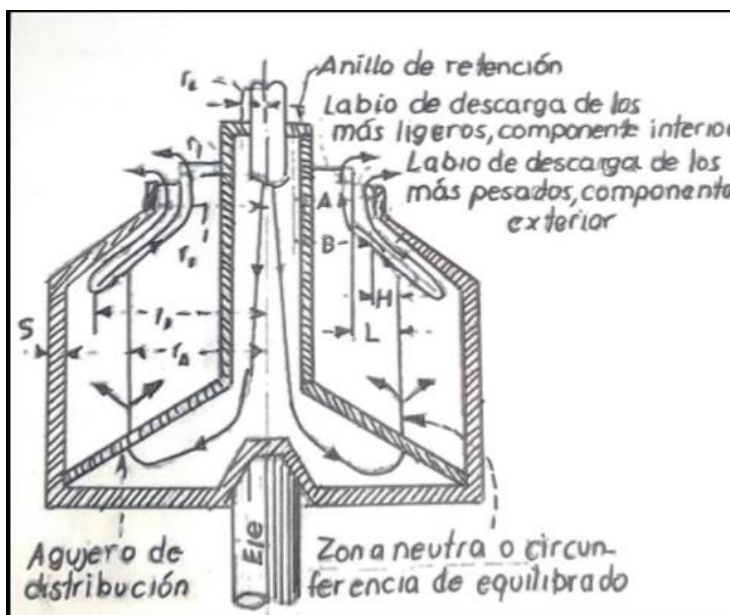


Figura 1. Esquema del principio de una taza separadora. Fuente: Salas, 2000

Otro parámetro importante en el funcionamiento de la centrífuga es la velocidad de flujo radial y longitudinal que tengan los componentes del fluido o pulpa al interior del tazón, lo que influye en la densidad que alcanzan las diferentes capas del flujo interno y por lo tanto influye también en la posición de la zona neutra (Salas, 2000).

En este grupo de centrífugas de lecho sedimentado se tiene:

1.4.2. Centrifugador chino

La centrífuga china adquiere la configuración de un tubo rotatorio instalado en un eje horizontal que gira a altas revoluciones por minuto (Salas, 2000). Se caracteriza por trabajar en forma discontinua con ciclos que pueden variar entre 2,5 a 3,5 minutos, donde la alimentación puede realizarse en 2 o 3 minutos y el lavado y descarga del pre concentrado en los restantes 0,5 minutos. El equipo cuenta con dos toberas, una para la alimentación de carga en forma de pulpa con una dilución de 30 a 40 % de sólidos, y la segunda tobera se utiliza para introducir agua de lavado donde se demuestra en la figura 2 (Salas, 2000).

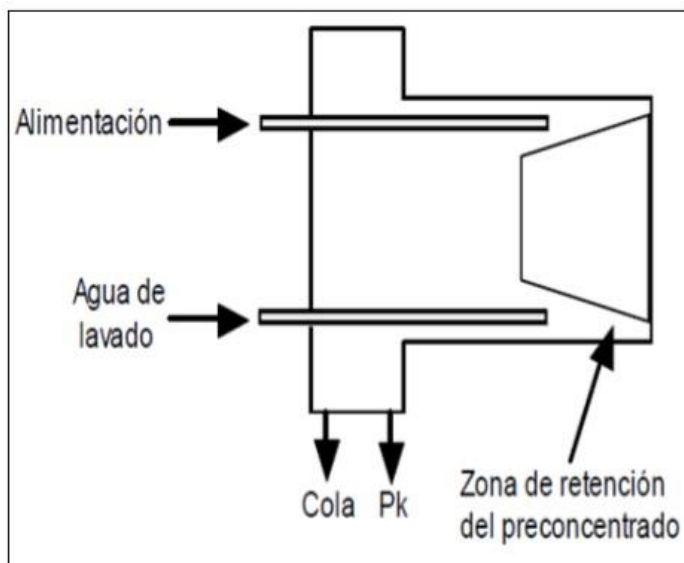


Figura 2. Esquema de una Centrifuga China. Fuente: Lou y Lin, 1981

1.4.3. Centrifugador gekko

Este equipo básicamente está compuesto por un rotor giratorio donde a lo largo de su pared interior, desde la base hasta la parte superior, contiene anillos circundantes cuyo propósito principal es el de retener a las partículas de mayor peso específico. La alimentación en forma de pulpa ingresa por una tobera directamente a la base del rotor, de donde, como resultado de la aplicación de la fuerza centrífuga al recipiente, la pulpa es obligada a adquirir un movimiento rotatorio. En esta modalidad de trabajo, las partículas de mayor peso específico son fácilmente retenidas en las hendiduras de los anillos del rotor, consiguiéndose de esta manera separar el material valioso respecto del estéril que rebosa por la parte superior del equipo (Armando, 2006).

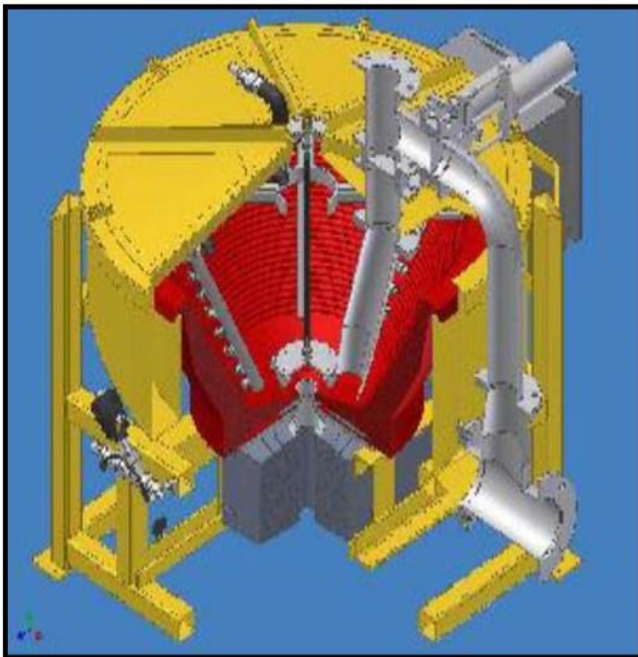


Figura 3. Centrifuga Gekko. Fuente: Gekko systems

Una característica particular de este equipo, es su simplicidad de operación, con muy poco o nada de consumo de agua además de tener un sistema de regulación de velocidad de giro. Es un equipo totalmente automatizado que es utilizado principalmente en el beneficio de menas de Oro (Armando, 2006).

1.5. Centrífugas de lecho fluidizado

Este tipo de centrífugas tienen 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 y 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. En los circuitos de molienda, los concentradores centrífugos son utilizados efectivamente para recuperar el oro liberado (Azanza, 1994).

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 (Azanza, 1994).

Recientemente han sido desarrollados los concentradores centrífugos de efusión semi - continua 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. Todos los concentradores centrífugos operan con el mismo principio: básicamente, un recipiente que rota efectúa la separación gravitacional de la carga en unos concentradores centrífugos más utilizados están basados en el mismo principio, pero difieren en su diseño técnico. Las más conocidas son las marcas Knelson y Falcony algunos de fabricación local (especialmente en Brasil), que generalmente no llegan a la eficiencia de los originales. Concentradores centrífugos son insuperables para la recuperación de Oro finísimo y laminado. Con las centrífugas se pueden lograr altos factores de enriquecimiento, permitiendo que se funda el concentrado directamente. En los circuitos de molienda, los concentradores centrífugos son utilizados efectivamente para recuperar el oro liberado.

1.5.1. Concentrador centrífugo Falcón

El principio de separación del concentrador Falcón está basado en la diferencia de pesos específicos de las partículas componentes de una carga mineralizada. Debido a que usa campos gravitatorios altos es capaz de separar minerales liberados en rangos de tamaño considerado como finos a ultra finos (Burt, 1984).

El concentrador centrífugo Falcón fue primeramente diseñado para el beneficio de Oro, aunque posteriormente se extendió su aplicación a otros minerales como: estaño, platino, minerales de hierro, ilmenita, carbón. Puede asemejarse a un cono Reichert centrífugo invertido cuya principal diferencia es que la alimentación se realiza por el centro del equipo (Mc Alister, 1998).

Constituido principalmente por un cilindro rotante, donde la geometría del rotor, interiormente en la parte inferior adquiere una forma cónica y en la parte superior una configuración cilíndrica en forma de anillos. Gira alrededor de los 2282 rpm, generando una fuerza centrífuga de hasta 300 G (Mc Alister, 1998). Este equipo responde favorablemente al tratamiento de granulometrías entre 1,651 a 0,020 mm (10 a 600 mallas Tyler), separando y recuperando material pesado (de mayor peso específico respecto al del estéril) considerado como fino y ultra fino (Mc Alister, 1989).



Figura 4. Falcon modelo B. Fuente: Sepro mineral systems.

1. Sus principales características son:

- Amplio rango de aplicación en el procesamiento industrial de minerales.
- Buena eficiencia en la recuperación de partículas finas.
- Rotor construido de Caucho, poliuretano, carburo y ni-hard para una máxima resistencia al desgaste.
- Pocas partes móviles.
- Alta confiabilidad en la obtención del concentrado.
- Modelos a escala laboratorio con alta capacidad.

2. Desde un punto de vista general, las principales ventajas que ofrecen estos equipos son:

- Elevada capacidad de procesamiento
- Bajo consumo de agua
- Recuperaciones elevadas, sobre todo en fracciones finas
- Bajos costos de inversión y de operación
- Pre concentración y concentración de minerales

Actualmente en el mercado existe una numerosa variedad de modelos del centrifugador Falcón, desde aquellos utilizados para escala laboratorio (semi-continuo), hasta los de uso industrial (continuo), cada uno con características y aplicaciones diferentes, además de los últimos modelos desarrollados para material ultra-fino (Ticona R.,2005).

1.5.2. 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).

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).

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).

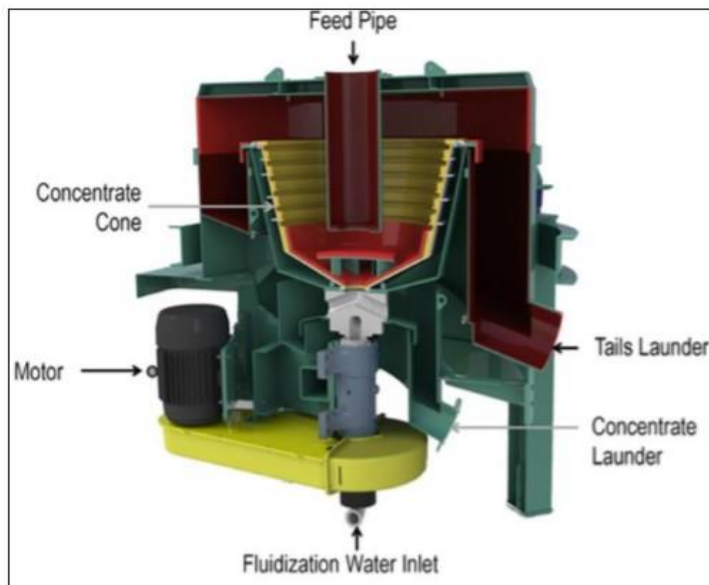


Figura 5. Concentrador Knelson. Fuente: Consep Engineering Innovation

1. Ventajas del concentrador Knelson:

- Recuperación rápida y eficiente a bajo costo
- Operación confiable y sin problemas
- Bajo costo de inversión, operación y mantenimiento
- Operación no contaminante y sin peligro para el medio ambiente
- Total, seguridad del concentrado
- Total, automatización disponible en todos los modelos

2. 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.

1.5.3. Centrífugas de lecho fluidizado pulsante

1. Mesas concentradoras –vibratorias

Las mesas concentradoras son aparatos de concentración gravimétrica con flujo laminar sobre una superficie inclinada. La mesa con movimiento longitudinal vibratorio (ver mesa vibradora en la figura 6) está muy difundida principalmente en la minería del Estaño, Wolframio y Oro. En la minería aurífera se usan especialmente los tipos Wilfley, Deister y Holman. Las diferencias entre unas y otras son mínimas, principalmente en el mecanismo del cabezal, la geometría del tablero y el tipo de enrielado (Bruno, 2012).



Figura 6. Mesa concentradora Wilfley. Fuente Savona Equipment

Las mesas vibradoras permiten una amplia variación en sus parámetros operativos y, de esta forma, se pueden adaptar al material de alimentación correspondiente. Debido a que el proceso de concentración se lleva a cabo a simple vista sobre la tabla de la mesa, cualquier cambio en los parámetros inclinación longitudinal y transversal, cantidad de agua, entre otros resulta en cambios en el comportamiento del material, que pueden ser visualizados inmediatamente enrielado (Bruno, 2012).

a. Las mesas vibratorias tienen las siguientes ventajas:

- Descarga continua de productos
- Permite obtener toda una gama de productos (concentrados, mixtos, colas)
- Comportamiento visible del material sobre el tablero
- Gran flexibilidad
- Manejo y supervisión relativamente simple
- Posibilidad de recuperar valiosos minerales acompañantes
- Buena recuperación y un alto índice de enriquecimiento, aún en el mineral fino
- Poco uso de agua y energía

b. Pero presentan algunos inconvenientes:

- Requiere atención continua
- Peligro de robo de concentrado rico

Se pueden usar las mesas en el mineral aurífero filoniano (vetas), para la recuperación de Oro fino liberado y muchas veces de piritas/sulfuros auríferos como subproducto comercial de la carga ruta o de concentrados obtenidos por otros equipos gravimétricos como canaletas o/y espirales enrielado (Bruno, 2012).

2. Equipo jigs

Permite separar los componentes de un mineral de acuerdo a su peso específico, en un medio acuoso que alterna la sedimentación libre y la sedimentación obstaculizada, gracias a la pulsación producida por diferentes mecanismos. En la minería aurífera primaria los componentes pesados están constituidos por el Oro y diferentes sulfuros (o por arenas negras en la minería aluvial), en tanto que los livianos son cuarzo y diferentes tipos de roca.

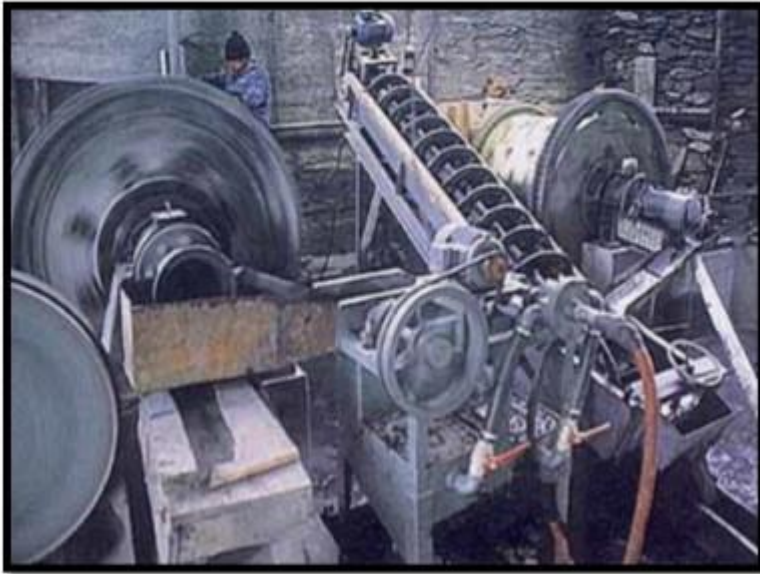


Figura 7. Jig tipo "Denever mineral Jig" en un circuito de molienda. Fuente: Elaboración propia.

Las posibilidades de uso del Jig en la minería son amplias, particularmente en la minería aurífera puede ser utilizado tanto en la filoniana (de vetas o primaria) como en la aluvial. La experiencia ha demostrado que resulta muy eficiente en la recuperación de Oro laminar y esponjoso, donde difícilmente es igualado por otros equipos gravimétricos (Armando, 2016).

En la minería primaria puede instalarse inmediatamente después del molino primario, para recuperar el Oro grueso, el Oro laminar, el Oro esponjoso y los sulfuros gruesos liberados, para impedir su retorno innecesario al molino en un circuito cerrado, evitando una mayor laminación del Oro y la sobre molienda de los sulfuros que son contaminantes potenciales. También puede utilizarse para el enriquecimiento complementario de productos procedentes de otras etapas.

En la minería aluvial puede también utilizarse como concentrador primario en vez o antes de las canaletas o utilizarse para el enriquecimiento complementario de pre

concentrados. Al contrario de las canaletas, los Jig necesitan operadores bien entrenados para obtener resultados buenos (Armando, 2016).

1.6. Tecnologías limpias aplicadas a la recuperación de oro

Las naciones unidas definen a la producción más limpia como “la continua aplicación de una estrategia ambiental preventiva e integrada, aplicada a procesos, productos y servicios para mejorar la eficiencia y reducir los riesgos a los humanos y al ambiente”, (Bruno, 2012). La producción más limpia es una herramienta para el desarrollo sostenible, su fin es el de implementar prácticas de producción que conduzca a la armonía entre el hombre y la naturaleza. La producción más limpia describe un acercamiento preventivo a la gestión ambiental, es un amplio término que abarca lo que algunos países/instituciones denominan eco eficiencia, minimización de residuos, prevención de la contaminación, o productividad verde. Por tal razón no debe ser considerada solamente como una estrategia ambiental, está relacionada también con beneficios económicos; es una estrategia que además de proteger el medioambiente, beneficia al consumidor y al trabajador mientras que mejora la eficiencia industrial, los beneficios y la productividad (Bruno, 2012).

1. Los objetivos de producción más limpia son entre otros:

- Aumentar la eficiencia operativa de los equipos y hacer uso racional de la energía.
- Prevenir, evitar, corregir y mitigar cargas contaminantes y disminuir riesgos
- Minimizar costos y lograr el máximo beneficio económico del material extraído mediante optimización del proceso.
- Optimizar los recursos naturales y las materias primas, minimizando o eliminando residuos o aprovechando estos para crear subproductos.

- Involucrar a la comunidad para mejorar las condiciones de seguridad industrial y salud laboral.
- Mejorar la calidad de los productos y de la imagen de la empresa ante clientes, proveedores, socios, comunidad, entidades financieras y otras partes interesadas.

Si los mineros aplican acciones y procesos productivos con producción más limpia encaminados a un mejoramiento continuo, mediante el control y el uso racional de las materias primas y la energía, el mejor manejo o eliminación de algunas materias tóxicas, la reducción de la cantidad de las emisiones contaminantes y los desechos, se verán compensados no sólo con el incremento de su producción sino también con el aumento de sus ingresos, lo que les permitiría mejorar la calidad de vida y la comunidad se beneficiará con mejores condiciones del medio ambiente (Bruno, 2012).

La minería a pequeña escala y artesanal utilizan mercurio más por costumbre o por la forma de organización de los mineros que por la necesidad real de los procesos. La búsqueda de una solución integrada del proceso es difícil, si consideramos que existe un dueño del amalgamado y otro del relave, así como muchas otras situaciones. Para lograr una solución integral no solo es necesario exponer una tecnología más limpia sino la aplicación de métodos nuevos y cambio de las prácticas. Por ejemplo, la “gravimetría” en la minería artesanal se torna eficiente para producir pre concentrado.

2. Producción más limpia en la concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es una manera sencilla, de alta capacidad, de bajo costo y de una eficacia razonable, para separar minerales pesados valiosos de la carga bruta, lo cual explica su extenso uso en la minería aurífera (Bruno, 2012).

La concentración gravimétrica se lleva directamente en el canalón o cuando se tiene alguna tecnificación, mediante una mesa y/o en un concentrador centrífugo donde en muchos casos se lleva a cabo el proceso de amalgamación con un control de la cantidad de mercurio utilizado y del tratamiento y deposición final de las colas resultado de estos procesos (Bruno, 2012).

1.7. Definición de términos

a. Minerales de Oro

El oro se encuentra en estado nativo comúnmente y se puede presentar en venas y filones de cuarzo, en este cuadro se ubican los diseminados. El Oro o se encuentra también en placeres y depósitos aluviales de corrientes antiguas y modernas.

b. Molino de bolas

El molino de bolas es un tambor cilíndrico horizontal que se apoya en descansos ubicados en sus tapas. El molino es accionado por un motor eléctrico, mediante engranajes, que hace girar el molino sobre su eje principal a una velocidad determinada y normalmente constante.

c. Concentración gravimétrica del oro

La concentración gravimétrica es un proceso tal cual que las partículas de tamaños distintos, forma y densidades son separadas unas de otras por la acción de la fuerza de gravedad o por la fuerza centrífuga.

d. Concentradores centrífugos

Los concentradores centrífugos constituyen la principal innovación realizada a los implementos de concentración gravimétrica de Oro.

e. Concentrador centrífugo Knelson

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

f. Concentrador Falcón

La recuperación de metales y minerales finos de los flujos de proceso ha sido siempre una dificultad. Con la serie de Concentradores Centrífugos Continuos Falcón.

Conclusiones parciales

De acuerdo a los trabajos consultados llegue a la siguiente conclusión:

1. Existe diversidad de trabajo que estudiaron la recuperación de Oro por concentración centrífuga, sin embargo, en ninguno se muestra la propuesta de un flujo tecnológico para el tratamiento de Oro de las colas finas del depósito de Aguas Claras por medio de concentradores centrífugos Knelson.

Capítulo 2

Materiales y Métodos

Capítulo 2. Materiales y Métodos

La selección de los métodos y de los materiales es muy importante en todo trabajo investigativo, para garantizar su desarrollo eficaz y la veracidad de los resultados, basado fundamentalmente en la toma y preparación de las muestras, la determinación de los parámetros de la función de distribución y de preparación del mineral.

Para la realización de esta investigación, por motivos de combustible y otros ajenos a la empresa no fue posible la búsqueda de las muestras necesarias para la realización del trabajo a las colas finas del depósito de Aguas Claras, tomando la decisión de que las pruebas hidrogravimétrica se realizaran con las muestras del yacimiento de oro de la UEB Oro Barita.

2.1. Generalidades del concentrador Knelson

El equipo Knelson ha sido usado con éxito en la recuperación de metales preciosos, tales como Oro, Platino y Plata y metales básicos como el Cobre. Metales nocivos para el medio ambiente tales como Plomo y Mercurio pueden también ser recuperados de tierras contaminadas, limpiando el medio ambiente.

El Concentrador Knelson es fabricado en diversos tamaños y modelos, desde el concentrador de laboratorio KC-MD3 hasta el equipo de alta producción KC-XD48 con capacidad de procesar 150 t/h. Las aplicaciones del equipo Knelson varían desde trabajos de laboratorio o exploración en campo hasta plantas piloto y producción a gran escala. Todos los modelos tienen incorporado el proceso de fluidificación patentado. Este proceso combinado con la fuerza centrífuga, ha hecho al concentrador Knelson el más avanzado equipo de concentración por gravedad disponible.

2.1.1. Los concentradores Knelson ofrecen:

- Recuperación rápida y eficiente a bajo costo
- Operación confiable y sin problemas
- Bajo costo de inversión, operación y mantenimiento
- Operación no contaminante y sin peligro para el medio ambiente
- Total seguridad del concentrado
- Total automatización disponible en todos los modelos
- Con la idea de surtir únicamente productos de la más alta calidad, los concentradores Knelson son producidos con:
- Piezas que van en contacto con la humedad construidas en acero inoxidable resistente a la corrosión (también disponibles en acero dulce)
- Recubrimientos y partes de desgaste muy resistentes en materiales especiales
- Cono concentrador de poliuretano de larga duración
- Standards de soldadura CWB (Canadian Welding Bureau)
- Standards CSA de los sistemas eléctricos (Canadian Standards Association).

2.1.2. Funcionamiento de un concentrador Knelson.

Dentro del Concentrador Knelson las partículas son sometidas a 60 veces la fuerza de la gravedad para asegurar la recuperación de partículas microscópicas que antes se pensaba eran no recuperables por medios gravimétricos. Esta fuerza centrífuga junto con el patentado proceso de fluidificación, permite que el Concentrador Knelson logre resultados excepcionales.

2.1.3. Procedimiento de operación del concentrador Knelson

- El agua es introducida a través de una serie de agujeros de fluidización al cono de concentración que está girando.
- Los lodos son introducidos a través del tubo estacionario de alimentación.
- Cuando los lodos llegan al fondo del cono, éstos son forzados por la fuerza centrífuga, hacia arriba en la pared interior del cono.
- Los lodos llenan cada anillo a su total capacidad, creando una cama de concentrado.
- La compactación de la cama de concentración se evita por medio del proceso patentado de fluidificación. 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.
- Cuando el ciclo de concentración se completa (8 a 24 h en concentración aluvial y 1 a 6 horas para rocas duras), se lavan los concentrados del cono y descargan en la artesa de concentrados del Knelson a través del cubo patentado multiportas. Este proceso puede ser terminado en 2 minutos sin riesgos de seguridad (Wotruba, & Vasters, 2002).

2.2. Caracterización química y mineralógica de las muestras estudiadas.

Los métodos físico-químicos empleados para la caracterización de las muestras estudiadas y ensayos metalúrgicos en cada análisis se muestran la tabla 1 siguiente:

Tabla 1. Métodos físico-químicos de las muestras estudiadas.

Parámetros	Método	Lugar de realización
pH	Potenciométrico con electrodo combinado	Laboratorio Oro Barita
Cianuro de sodio y cianuro libre	Método volumétrico, Standart Methods, 4500-CN-D, 1995.	Laboratorio CIPIMM
Au	Docimasia	Laboratorio CIPIMM
Metales (Au, Fe, Cu, Zn, Pb)	Interruptor de control de potencia	Laboratorio CIPIMM
ST y SiO ₂	Gravimétrico	Laboratorio CIPIMM

Los contenidos de Oro de cada una de las muestras estudiadas se determinaron, aplicando las técnicas de ensayo al fuego convención al y ensayo al fuego seguido de absorción atómica. Además, se determina por técnicas de análisis químico elemental como Interruptor de control de potencia (ICP), Espectros copia de Masa de Plasma Acoplada Inductivamente, las concentraciones de aquellos elementos que pudieran interferir en los procesos de extracción.

La caracterización mineralógica se realizó con empleo de las técnicas de microscopia electrónica de barrido con analizador de rayos X. Las imágenes y espectros realizados se obtuvieron mediante el empleo de un microscopio marca TESCAN, modelo 5130SB y un analizador de rayos X de la marca OXFORD INSTRUMENTS modelo INCA350.

Las imágenes de Microscopía Electrónica se procesaron mediante el software VEGA TC versión 1 y los micros análisis de rayos X mediante el software INCAENERGY. Con vistas a profundizar en los contenidos de minerales pesados en las muestras, se obtuvieron 3 concentrados mediante líquidos densos. Para la determinación de los principales minerales formadores y accesorios se prepararon 3 secciones semi- pulidas.

2.3. Otros materiales empleados en el estudio fueron:

1. NaCN, grado reactivo, procedente de la planta Oro Barita.
2. CaO, grado técnico, procedente de la planta UEB Oro Barita. Pureza (65.4 % CaO).
3. PbNO₃, Nitrato de Plomo, grado reactivo, procedente de la planta Oro Barita Golden Hill.
4. NH₄OH, Hidróxido de Amonio al 25 %, grado reactivo.
5. Indicador Rodamina, uso laboratorio.
6. Agua industrial.
7. Hipoclorito de sodio, grado reactivo.
8. KCl, cloruro de potasio, grado industrial, -1 mm.

La conformación de las tres variantes de la muestra tecnológica en estudio, fueron a partir de testigos de perforación por pozos, tomando las muestras metro a metro (según su cambio litológico), los pozos cortaron todo el paquete de roca desde la cota superficial (+143) hasta el Banco + 56, pasando por el + 123 y + 104, tomándose para su conformación $\approx$ 1.9 ton en base húmeda repartidas entre las 3 muestras de estudio. Los pozos escogidos para la conformación de las muestras tecnológicas se pueden observar en las tablas 5, 6 y 7, teniendo en cuenta la calidad de su pesaje, contenido de oro y azufre (TOBMT1 - Au: 1.766 g/t y S: 3.394 %; TOBMT 2 - Au: 1.64 g/t y S: 4.604 % y TOBMT 3 - Au: 2.039 g/t y S: 7.16 %), también se tuvo en cuenta la caracterización mineralógica, litología, tipo de clase y granulometría donde el por ciento de arcilla estuvo variable en las muestras.

Tabla 2. Coordenadas de los pozos involucrados para conformar la muestra TOBMT1.

Pozos	X inicio	Y inicio	Z inicio	Profundidad
P-4,13	591608,2	154720,3	146,66	46,0
P-5,14	591613,7	154735,1	146,321	54,9
P-7,15	591634,9	154749,3	146,178	64,0
P-8,16	591650,5	154749,9	142,467	63,6
P-9,15	591665	154746,6	143,048	56,0
P-10,18	591681,1	154745,2	143,542	40,0
P-10,25	591663,5	154775,5	142,983	93,0
P-13,10	591692,2	154792,1	143,068	77,5
P-14,12	591707,4	154800,6	140,953	73,5
CN-17,19	591791,3	154727,9	142,735	49,0
CN-18,18	591802,6	154734,3	142,424	57,0
CN-19,14	591804,5	154758,1	136,737	49,0
CN-20,13	591811,5	154768,6	136,903	33,0
CN-22,7	591825,7	154793,8	136,887	36,7
CN-23,7	591833,9	154804,6	137,15	37,0

Tabla 3. Coordenadas de los pozos involucrados para conformar la muestra TOBMT2.

Pozos	X inicio	Y inicio	Z inicio	Profundidad
P-4,13	591608,2	154720,3	146,66	46,0
P-5,14	591613,7	154735,1	146,321	54,9

P-7,15	591634,9	154749,3	146,178	64,0
P-8,16	591650,5	154749,9	142,467	63,6
P-9,15	591665	154746,6	143,048	56,0
P-10,18	591681,1	154745,2	143,542	40,0
P-10,25	591663,5	154775,5	142,983	93,0
P-13,10	591692,2	154792,1	143,068	77,5
P-14,12	591707,4	154800,6	140,953	73,5
CN-17,19	591791,3	154727,9	142,735	49,0
CN-18,18	591802,6	154734,3	142,424	57,0
CN-19,14	591804,5	154758,1	136,737	49,0
CN-20,13	591811,5	154768,6	136,903	33,0
CN-22,7	591825,7	154793,8	136,887	36,7
CN-23,7	591833,9	154804,6	137,15	37,0

Tabla 4. Coordenadas de los pozos involucrados para conformar la muestra TOBMT3.

Pozos	X inicio	Y inicio	Z inicio	Profundidad
P-4,13	591608,2	154720,3	146,66	46,0
P-5,14	591613,7	154735,1	146,321	54,9
P-7,15	591634,9	154749,3	146,178	64,0
P-8,16	591650,5	154749,9	142,467	63,6
P-9,15	591665	154746,6	143,048	56,0
P-10,18	591681,1	154745,2	143,542	40,0
P-10,25	591663,5	154775,5	142,983	93,0
P-13,10	591692,2	154792,1	143,068	77,5
P-14,12	591707,4	154800,6	140,953	73,5
CN-17,19	591791,3	154727,9	142,735	49,0
CN-18,18	591802,6	154734,3	142,424	57,0
CN-19,14	591804,5	154758,1	136,737	49,0
CN-20,13	591811,5	154768,6	136,903	33,0
CN-22,7	591825,7	154793,8	136,887	36,7
CN-23,7	591833,9	154804,6	137,15	37,0

La preparación de las muestras tecnológicas se realizó como se muestra en el Anexo 1. Se prepararon las muestras para la determinación del contenido de oro, azufre, análisis granulométrico, mineralógico y las condiciones experimentales en cuanto a granulometría establecidas.

2.4. Métodos en los ensayos metalúrgicos.

- **Pruebas hidrogravimétricas por concentración centrífuga.**

El concentrador centrífugo Knelson figura 8 consiste de un cono perforado con anillos internos que gira a alta velocidad. La alimentación, que en general debe ser inferior a 1/4, es introducida como pulpa (20- 40% sólidos en peso) por un conducto localizado en la parte central de la base del cono. Las partículas, al alcanzar la base del cono, son impulsadas para las paredes laterales por la acción de la fuerza centrífuga generada por la rotación del cono.

Se forma un lecho de volumen constante en los anillos, los cuales retienen las partículas más pesadas, mientras que, las más livianas son expulsadas del lecho y arrastradas por arriba de los anillos para el área de descarga de relaves en la parte superior del cono. El cono gira a una velocidad de 400 rev / min .

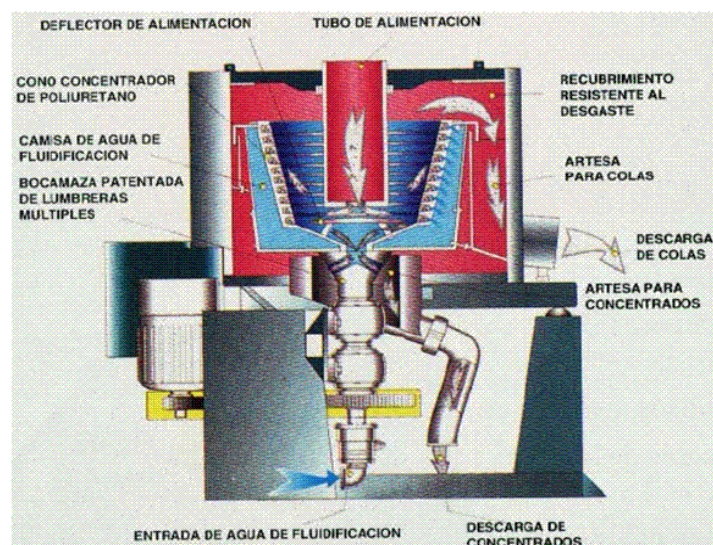


Figura 8. Esquema del concentrador Knelson, corte transversal. Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros operacionales generalmente más manipulados en el concentrador Knelson son el porcentaje de sólidos y la presión de agua de fluidización. La granulometría de la mena también es un factor importante a ser considerado; el límite es de 6mm, no habiendo límite inferior especificado. La razón másica obviamente debe ser también tomada en cuenta.

El equipo somete a las partículas a 60 veces la fuerza de la gravedad para asegurar la recuperación de partículas microscópicas que antes se pensaba eran no

recuperables por medios gravimétricos. Esta fuerza centrífuga junto con el patentado proceso de fluidificación, permitiendo que el Concentrador Knelson logre resultados excepcionales.

Como parte de los trabajos de investigación tecnológica se previó un estudio hidrogravimétrico para determinar si el Oro en las muestras era recuperable por esta técnica. Para la ejecución de las pruebas del Knelson se empleó el procedimiento estándar establecido en el Manual de Calidad del Grupo de Aprovechamiento de Minerales, GAMPT-03-01.

Conclusiones parciales

Se aplican las características de las muestras a evaluar y el equipamiento del esquema tecnológico seleccionado utilizando el método de ensayo por concentración centrífuga.

Capítulo 3

Resultados y Discusión

Capítulo 3. Resultados y discusión

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos y elección del equipamiento del flujo tecnológico propuesto para la recuperación de oro por el concentrador centrífugo Knelson.

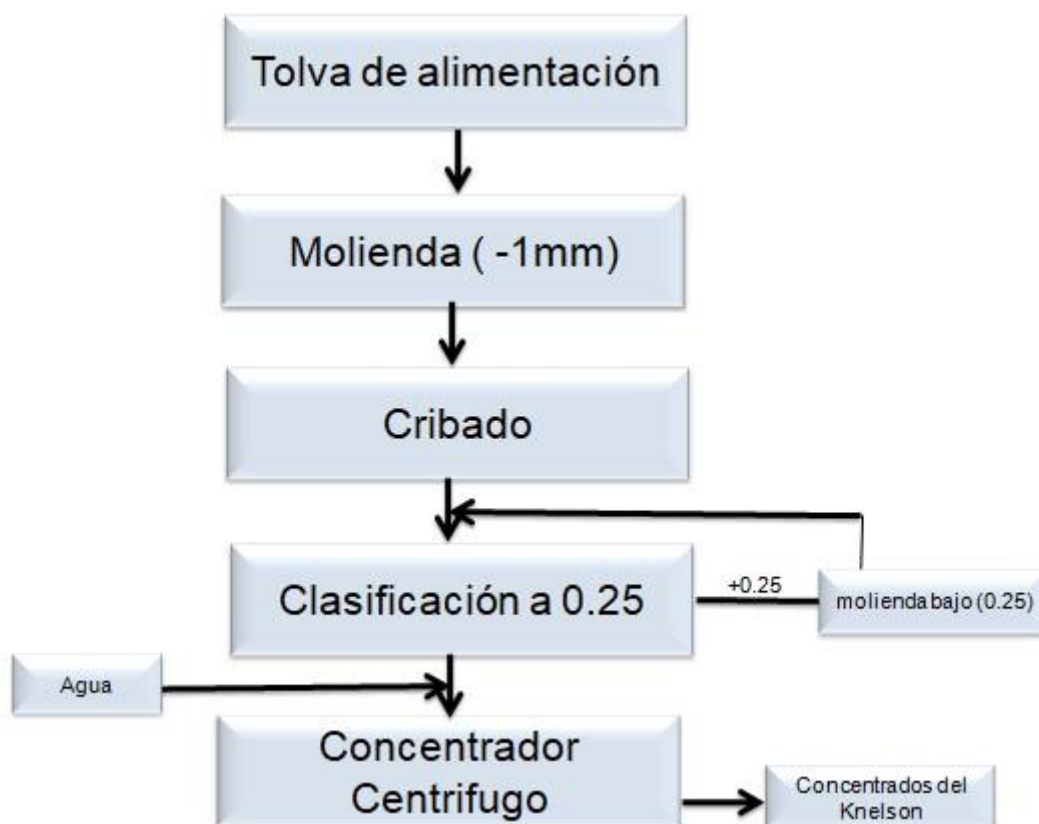


Figura 9. Flujo tecnológico propuesto. Fuente: Elaboración propia.

3.1. PRUEBAS GRAVIMETRICAS.

Como parte de los trabajos de investigación tecnológica se ha previsto un estudio gravimétrico para determinar si el Oro en las muestras a estudiar es posible concentrarlo antes de pasarlo a la tecnología por percolación. Los cuales incluyen, pruebas en concentrador gravimétrico Knelson.

3.2. Pruebas en Knelson.

3.2.1. Los parámetros operacionales establecidos fueron los siguientes:

- Por ciento de sólido en la alimentación: 25%
- Flujo de sólidos en la alimentación: 500– 600 g/min
- Flujo de alimentación pulpa (l/min): 1.6 - 1.7
- Presión de agua de fluidización: 3Pa
- Productos obtenidos por cada etapa: Concentrado, Producto Medio y Cola.

3.2.2. Recursos Necesarios.

Para la preparación de las muestras en la investigación se requiere:

- Trituradores.
- Molinos.
- Pulverizadores.
- Cuarteadores.
- Palas.
- Carretillas.
- Balanzas Técnicas.

Materiales:

- Sacos plásticos
- Sacos multicapas.
- Bolsas plásticas.
- Bandejas y recipientes para secado.

3.3. Caracterización química de las muestras tecnológicas estudiadas.

La caracterización química de las muestras estudiadas aparece en la tabla 2 que se muestra a continuación. Mientras que en la tabla 3, se exponen los resultados de los análisis químicos para los elementos Oro y Azufre, tanto por cabeza directa, cabeza recalculada (Análisis granulométrico).

Tabla 5. Caracterización química de las muestras tecnológicas conformadas a partir de los testigos de perforación de la muestra tecnológica TOB.

Muestra	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu (%)	Pb (%)	Ba (%)	K (%)	Al (%)
TOBMT1	4,46	14,93	0,12	0,36	7,94	2,72	8,2
TOBMT2	4,13	16,65	0,10	0,37	7,98	2,59	7,1
TOBMT3	4,73	16,85	0,15	0,38	7,90	2,64	7,8
Muestra	Mg (%)	Ca (%)	Fe (%)	Zn (%)	SiO ₂ (%)	ST (%)	
TOBMT1	0,69	1,23	3,50	1,68	27,20	4,14	
TOBMT2	0,55	1,04	4,38	1,47	26,82	4,63	
TOBMT3	0,66	1,13	4,54	2,44	27,54	7,15	

Tabla 6. Resultados de los análisis químicos de Oro y Azufre total por cabeza directa y recalculada.

Muestra	Au (g/t)	ST (%)	Au (g/t)	ST (%)	Au (g/t)	ST (%)
	Cabeza recalculada		Cabeza directa		Pasaporte	
TOBMT1	4,47	4,12	4,46	4,14	1,77	3,394
TOBMT2	4,07	4,61	4,13	4,63	1,64	4,604
TOBMT3	4,83	7,18	4,73	7,15	2,04	7,160

Como se observa en la tabla 3, los valores reportados en cuanto al contenido de Oro por cabeza directa y cabeza recalculada fueron similares, sin embargo, no coincidieron con los reportados según pasaporte técnico.

Las diferencias analíticas obtenidas se explican debido a que, los resultados de los análisis químicos básicos empleados para la conformación de las muestras a estudiar, que fueron analizadas en nuestros laboratorios (836 análisis), reportaron valores por debajo de los obtenidos en las muestras finales conformadas para la investigación, comportamiento que estuvo influenciado por problemas técnicos presentados por el horno de fundición (criollo); en el cual no se consiguió alcanzarla temperatura en el rango óptimo (1100 – 1200°C) para que todo el Oro presente en la muestra (crisol) se fundiera obteniéndose un

botón de metal adecuado. Provocando que, en la etapa posterior del análisis, donde se realiza el proceso de copelación, solamente se colecte el Oro obtenido en el botón.

Los resultados obtenidos en las muestras finales a investigarse realizaron en un horno de fusión eléctrico, donde se garantizó el rango óptimo de temperatura.

Con relación a los análisis de azufre no se reportaron diferencias significativas en la TOBMT2 y TOBMT3, respecto a lo reportado en el pasaporte técnico, excepto en la muestra TOBMT1 que se reportó una ligera diferencia.

Los contenidos de azufre reportados, como bien se conoce, son característicos de las menas objeto de estudio. Este comportamiento afecta negativamente, aportando acidez al proceso y elevando los consumos de cal, demostrándose en el valor del pH inicial del mineral el cual se comportó entre valores de pH de 3 a 5.

En relación con los cianicidas presentes (Cu, Pb, Fe y Zn) en las muestras conformadas para el estudio, se pudo observar una similitud con los valores reportados en la muestra experimental.

A continuación, en la tabla 4 se muestran los resultados de los análisis físicos de las tres muestras estudiadas.

Tabla 7. Caracterización Física de las muestras tecnológicas estudiadas.

Muestra	Peso específico (g/cm³)	Peso volumétrico (g/cm³)	pH mineral	Humedad (%)
TOBMT1	2,89	1,051	4 - 5	2,49
TOBMT2	2,88	1,050	4 - 5	2,47
TOBMT3	2,91	1,048	3 - 4	2,45

Los valores del peso específico y volumétrico de las muestras tecnológicas de estudio coincidieron con la de la muestra experimental, siendo lógico pues todas fueron conformadas de un mismo sector del yacimiento en el nivel donde comienzan a aparecer

las menas en explotación del yacimiento Oro Barita. Mientras que el pH de las mismas varió de acuerdo a los contenidos de azufre presente en las muestras, observándose en la TOBMT3 valores más alto en comparación con las otras dos.

En la figura3, se presentan los resultados del análisis de la curva de molienda de las muestras de estudio, las cuales son similares a estudios anteriores realizados en nuestro centro (2011, 2013, 2016). Las curvas de moliendas se solapan, teniendo similares comportamientos de dureza del material. Pues pertenecen a la misma cota, de donde se hicieron las perforaciones para extraer las muestras originales.

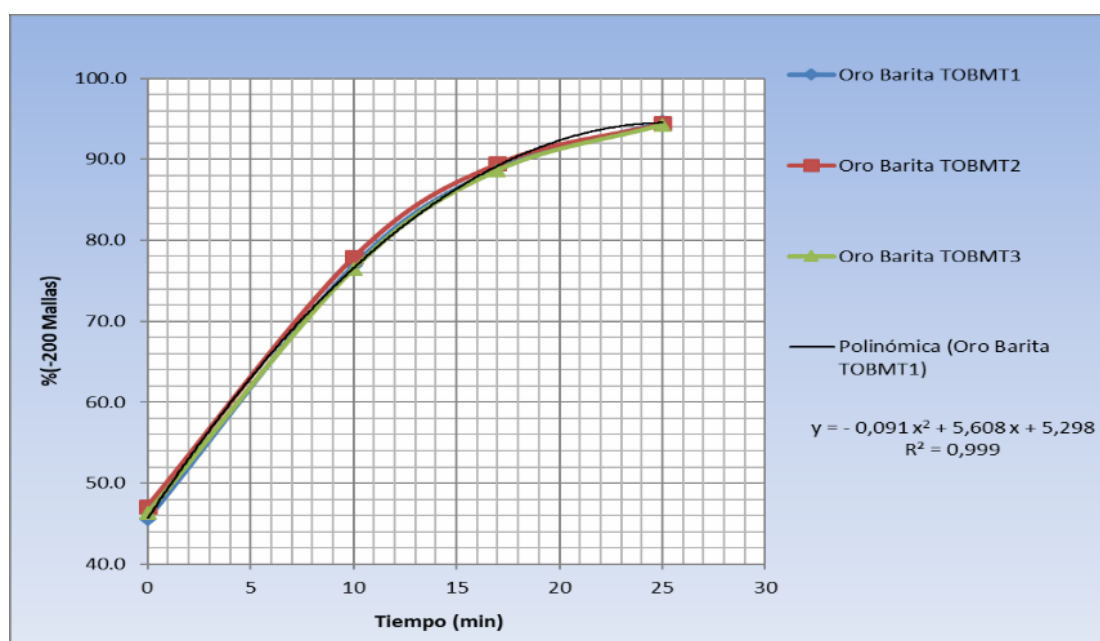


Figura 10. Curva de Molienda muestras estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 5, 6 y 7 se presentan los resultados del análisis granulométrico bajo 1 mm de las muestras en estudio, la distribución de la ley de Oro en dichas muestras fue heterogénea, observándose en la fracción (-0,5 + 0,074 mm) los contenidos de oro más altos que representan en la TOBMT1 (47, 7%), TOBMT2 (53,7 %) y en la muestra TOBMT3 (46, 69 %) por ciento en peso de la fracción másica.

Tabla 8. Análisis granulométrico bajo 1 mm de la muestra tecnológica TOBMT1.

FRACCION GRANULOMÉTRICA (mm)	% PESO	% PESO ACUMULADO	Ley de Oro (g/t)
+ 1,0	0,70	0,70	NR
-1,0 + 0,5	15,79	16,49	3,01
-0,5 + 0,212	13,99	30,48	4,39
-0,212 + 0,106	19,06	49,54	6,90
-0,106 + 0,074	14,67	64,21	7,20
-0,074	35,79	100	2,97
TOTAL	100,00		4,47 g/t

Tabla 9. Análisis granulométrico bajo 1 mm de la muestra tecnológica TOBMT2.

FRACCION GRANULOMÉTRICA(mm)	% PESO	% PESO ACUMULADO	Ley de Oro (g/t)
-1,0 +0,5	15,23	15,23	2,89
-0,5 +0,212	16,65	31,88	3,18
-0,212 +0,106	18,78	50,66	3,57
-0,106 +0,074	18,31	68,97	6,80
-0,074	31,03	100	3,81
TOTAL	100, 00		4, 07 g/t

Tabla 10. Análisis granulométrico bajo 1 mm de la muestra tecnológica TOBMT3.

FRACCION GRANULOMÉTRICA(mm)	% PESO	% PESO ACUMULADO	Ley de oro (g/t)
-1,0 +0,5	16,14	16,14	4,53
-0,5 +0,212	14,86	31,00	6,54
-0,212 +0,106	13,85	44,85	4,53
-0,106 +0,074	17,98	62,83	3,58
-0,074	37,17	100	5,00
TOTAL	100,00		4,83 g/t

Los resultados obtenidos en los análisis granulométricos (cabeza recalculada), confirmaron las leyes por cabeza directa reportadas en las muestras estudiadas.

3.4. Resultados de las pruebas hidrogravimétricas con empleo de la técnica del Knelson.

Con vistas a evaluar la posibilidad de recuperar parte del Oro asociado a los sulfuros presentes en una de las muestras tecnológicas estudiadas, se decidió realizar pruebas hidrogravimétricas con empleo de la técnica del Knelson a la muestra (TOBMT1). (Anexo 1).

El principal uso que posee el Concentrador Knelson, es el de recuperar el oro contenido en material aluvial, y en la recuperación de oro en pre-concentrados para elevar su ley.

El Concentrador Knelson, utilizado en este trabajo de investigación, posee un diámetro máximo de cono de concentración de (7,62cm). El mismo, es un sistema de recuperación gravimétrica, el cual opera basado en dos principios fundamentales: una fuerza centrífuga que logra multiplicar los efectos de la fuerza gravitacional y la fluidización del material alimentado, donde la velocidad de asentamiento de una partícula se equilibra con un fluido que es inyectado en contra corriente a una velocidad igual que la de asentamiento.

La alimentación de la pulpa al cono de concentración se realiza por el tubo estacionario de alimentación, el cual les permite a las partículas entrar al primer anillo de concentración; aquellas que tengan velocidad terminal menor a la velocidad de los fluidos serán arrastradas hacia fuera de este.

El trabajo con el concentrador Knelson se realizó según los procedimientos establecidos en el Grupo de Aprovechamiento de Minerales (GAM PT-03-01). La granulometría empleada en los estudios fue por debajo de -1,0mm.

A continuación, en la Tabla 8 se muestra la eficiencia de una prueba preliminar con el concentrador gravimétrico Knelson de la muestra TOBMT1. La decisión de realizar las pruebas con la muestra seleccionada respondió a evaluar el empleo de esta técnica que clasifica por concentración centrífuga, al Oro libre contenido en la muestra. También se tuvo en cuenta la similitud en cuanto al contenido de Oro y la mineralogía.

Tabla 11. Eficiencia de trabajo del concentrador Knelson en la muestra tecnológica TOBMT1.

Tamaño de molienda P80 (micras)		Masa		Oro	
	Producto	(g)	(%)	Ley (g/t)	Eficiencia (%)
850	Concentrado lavado	67,2	2,46	30,62	15,5
	Producto Medio	40,2	1,47	8,33	2,5
	Cola	130,5	4,77	3,6	3,5
	Cola Final	2735,5	92,00	3,8	78,4
	Total (Cabeza)	2973,4	100	4,46	100
Concentrador. Knelson (Valor ORG)		107,4	3,64	22,3	18,04

En la tabla 8, se puede observar que en la prueba preliminar con la utilización del concentrador gravimétrico Knelson, se obtuvo solo un 18.04 % de eficiencia, lo cual significa que el Oro no es recuperable eficientemente por gravimetría y por tanto no se justifica en la muestra estudiada, demostrando que el proceso sería poco factible.

En otros estudios se pudiera considerar la posibilidad de incorporar al esquema tecnológico un proceso para beneficiar las menas en explotación, que evidencien un costo-beneficio aceptable para el procesamiento de las menas.

Conclusiones Parciales

1. Los ensayos preliminares con empleo de la técnica del concentrador gravimétrico Knelson en la muestra TOBMT1, reportó una ley de Oro de 22,3 (g/t) y 18, 04 % de eficiencia por tanto no se justifica en la muestra estudiada, lo cual significa que el Oro no es recuperable eficientemente por gravimetría. De acuerdo con los resultados de esta tecnología.

Conclusiones Generales

- Las bibliografías consultadas nos permitieron expresar fundamentos teóricos basados en las características y funciones de los concentradores centrifugos.
- Se aplican las características de las muestras a evaluar y el equipamiento del esquema tecnológico seleccionado utilizando el método de ensayo por concentración centrifuga reportando una ley de Oro de 22,3 (g/t) y un 18, 04 % de eficiencia por tanto no se pudo justificar la muestra estudiada, lo cual significa que el Oro no se pudo recuperar.

RECOMENDACIONES

1. Continuar las investigaciones de los métodos hidrogravimétricos en las condiciones actuales del yacimiento, como complemento a la tecnología actual.
2. Realizar un estudio medio ambiental para evaluar los posibles impactos generados con la alternativa tecnológica propuesta, así como el comportamiento de las colas residuales.
3. En otros estudios se pudiera considerar la posibilidad de incorporar al esquema tecnológico un proceso para beneficiar las menas en explotación, que evidencien un costo-beneficio aceptable para el procesamiento de las menas.

Referencias Bibliográficas

1. N. Arredondo. Concentración de minerales. Departamento de Metalurgia, Universidad Arturo Prat, Apuntes, Iquique 2007.
2. J. Ossandon. Concentración gravitacional a minerales de oro de plantas de ENAMI. Trabajo de Titulación. Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, Copiapó 2011.
3. M. Maggi, C. Vega. Beneficio de un Mineral de Tungsteno de la Región de Atacama mediante concentración gravitacional y flotación. Trabajo de Titulación. Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, Copiapó 2008.
4. A. Mella, J. Acevedo. Tentativa de Concentración de Oro desde Relave de Flotación, mediante espiral Humphrey”, Trabajo de Titulación. Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, Copiapó 1987.
5. L. Valderrama. Procesos de Concentración Gravitacional de Minerales. Universidad de Atacama, Apuntes, Copiapó 2003.
6. Villachica C. (2010) “Proceso metalúrgico alternativo para la minería aurífera artesanal”.
7. Torres, J. (2011). “Evaluación de los Métodos de Concentración Gravimétrica para la Recuperación de oro”.
8. Saúl Lucio Llampi Pineda, (2013) “estudio de pre factibilidad para la instalación de una planta gravimétrica de concentración de oro aluvial en tingo maría”.
9. Martin Ángel Parillo Colque (2014) “estudio metalúrgico de minerales de oro del sector limbani – región Puno”.
10. Cliffoord D., (1999) “Concentración Gravimétrica”, Mining Journal – Edición en español.
11. Armando Álvarez q. (2006) “tecnología de la concentración centrífuga”.
12. Burt R. O., (1984) “Gravity Concentration Technology”, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
13. Cano C. M., (1991), “Aplicación de espirales en la concentración de minerales”.

14. Salas A., Hinojosa O. (2000) "Concentración centrífuga, alternativa al tratamiento de finos de casiterita".
15. Azanza, J., (1994) "Ensayos con el concentrador Knelson. Informe PMSC, Loja":
<http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2-16.htm>
16. McAlister S., (1998) "Development of the Falcon Concentrator, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration".
17. McAlister Steven A., (1989) "Fine Gold Recovery using Falcon Concentrator", Northwest Mining Association, 95th Annual Convention, Short course and Trade Show.
18. García Manuel O. (1999) "Recuperación de oro fino por Concentrador Knelson a partir de las colas del Proceso de beneficio de la Mena Aurífera de la Empresa CVG Minerven C.A".
19. Bruno Emilio Chaucayanqui Quisa (2012). "Modelo de planta piloto para recuperación del oro de la pequeña minería y minimizar los impactos ambientales".

Anexos

Anexo 1. ESQUEMADE PREPARACIÓN BARITA 2023 MT1

“PREPARACIÓN DE LA MUESTRA TECNOLÓGICA DE ORO BARITA” TOBMT1

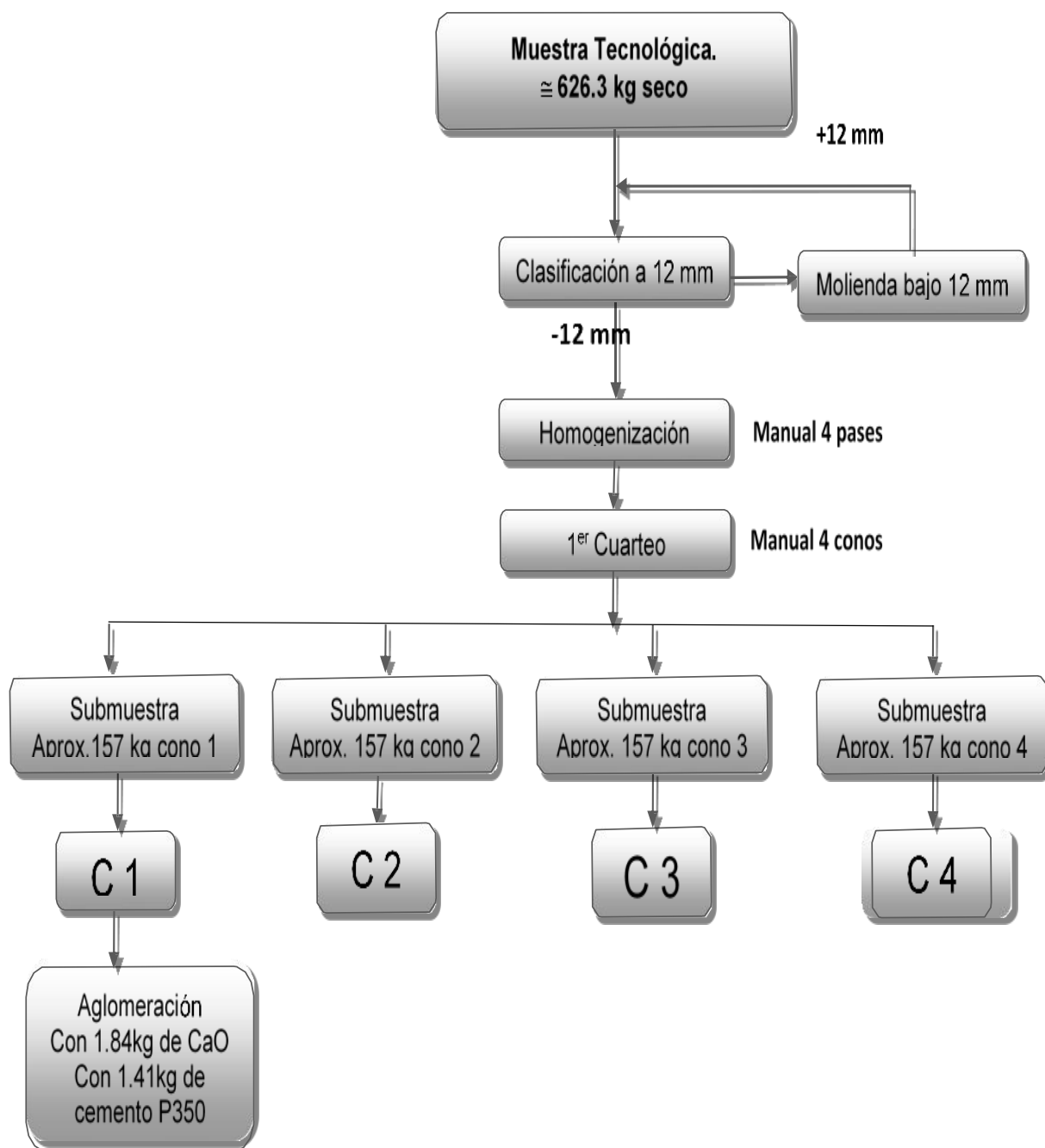


Figura1.Plan de preparación de la muestra tecnológica

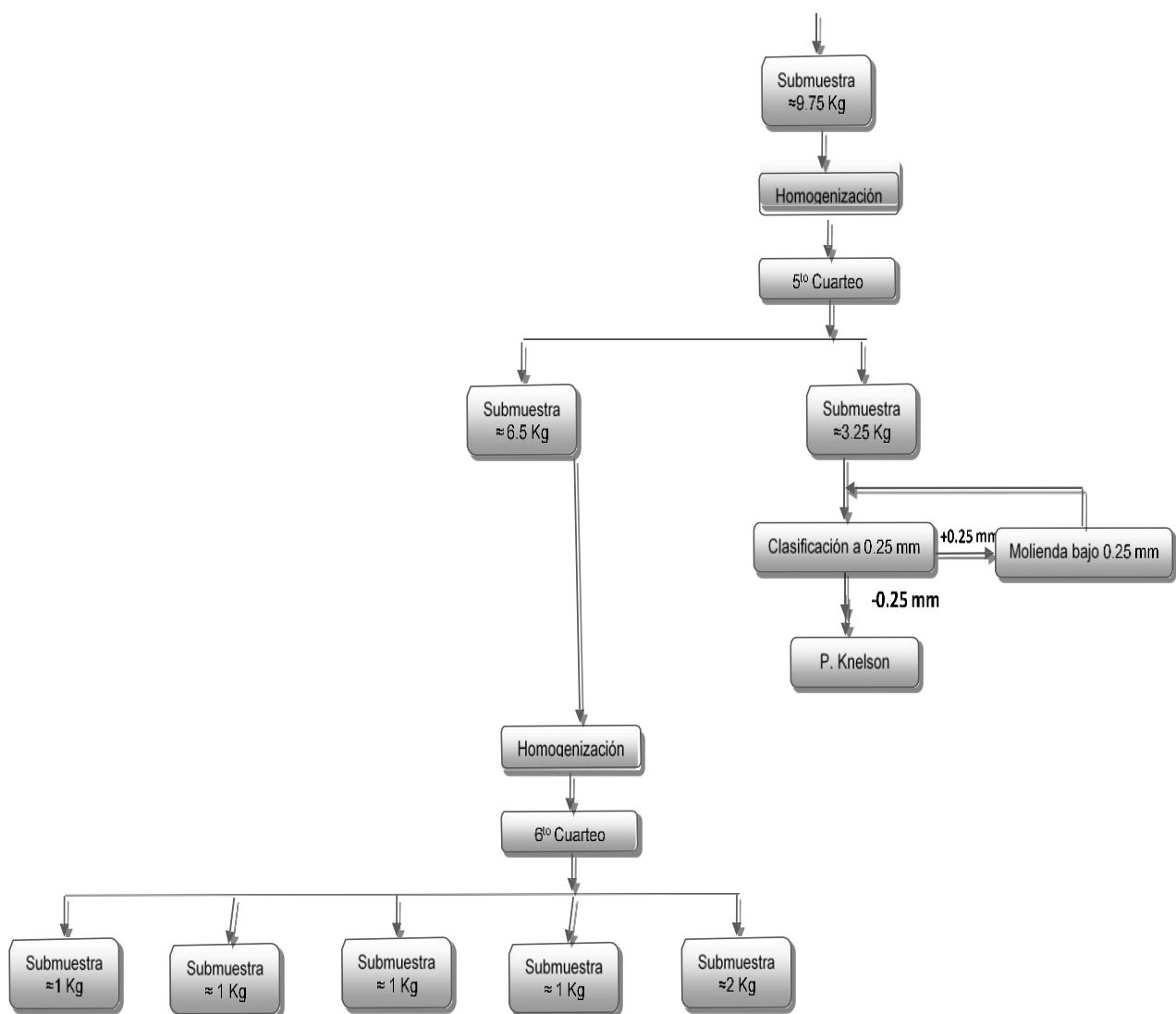


Figura1.2 Continuación de la figura 1



Anexo 2. Concentrador Knelson Oro Barita



Anexo 3. Planta hidrogravimetrica.