

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN  
DE ORO CON UN CONCENTRADOR CENTRÍFUGO  
PARA LA PEQUEÑA MINERÍA AURÍFERA**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Alex Sanders Huarecallo Condori

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA – PERÚ

2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN  
DE ORO CON UN CONCENTRADOR CENTRÍFUGO  
PARA LA PEQUEÑA MINERÍA AURÍFERA**

**TESIS**

Tesis sustentada, y aprobada el día 26 de Octubre de dos mil dieciocho por el Bachiller Alex Sanders Huarecallo Condori, siendo el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE

  
.....  
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO

  
.....  
Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

VOCAL

  
.....  
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

ASESOR

  
.....  
Dr. Freddy Felipe Cori Nina

## **DEDICATORIA**

Este presente trabajo va dedicado a mis padres Alejandro Huarecallo y Gloria Condori, a mi hermana Daysi Huarecallo, a mi sobrino Joaquín Ramírez, mi cuñado Percy Ramírez y en especial a mi amor Stephany Aguilar Ventura por todo su gran apoyo en esta nueva etapa de mi vida, por creer en mí y ser el impulso para lograr esto tan deseado.

A todas las personas quienes fueron parte de este trabajo y me apoyaron diariamente.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente agradezco a la casa Superior de Estudios por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas para poder estudiar en ella mi carrera. Agradezco a mi asesor, Dr. Freddy Felipe Cori Nina y mis maestros, que personas de gran sabiduría quienes se han esforzado por brindarme la ayuda necesaria para poder llegar al punto en el que me encuentro.

## CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 Descripción del problema	3
1.1.1 Antecedentes del problema.	3
1.1.2 Problemática de la investigación.	4
1.2 Formulación del problema	5
1.3 Justificación e importancia	6
1.4 Alcances y limitaciones	6
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivo específico	6

1.6 Hipótesis	7
1.6.1 Hipótesis general.	7
1.6.2 Hipótesis específico.	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Antecedentes del estudio	8
2.2 Bases teóricas	11
2.2.1 Mineral de oro	11
2.2.2 Depósitos epitermales – mineralización de oro	11
2.2.3 Evolución histórica minera	13
2.2.4 Generalidades de la concentración por gravedad	16
2.2.5 Tipos de equipos concentradores centrífugos	21
2.2.6 Centrífugas de lecho sedimentado	22
2.2.7 Centrífugas de lecho fluidizado	29
2.2.8 Centrífugas de lecho fluidizado pulsante	43
2.2.9 Variables de operación del equipo falcón	48
2.2.10 Variables de operación del equipo jigs	52
2.2.11 Tecnologías limpias aplicadas a la recuperación de oro	56
2.2.12 Producción más limpia en la concentración gravimétrica	59
2.3 Definición de términos	59
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	62
3.1 Tipo y diseño de investigación	62
3.2 Población y muestra de estudio	63

3.3 Operacionalización de variables	65
3.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos	66
3.5 Procedimiento y análisis de datos	66
3.5.1 Instrumentos y equipos.	67
3.5.2 Procedimiento experimental.	69
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS	74
4.1 Resultados	74
4.1.1 Resultados de la caracterización física	74
4.1.2 Resultados del análisis granulométrico	74
4.1.3 Resultados de la concentración en el concentrador falcón	76
4.1.4 Resultados de la concentración en el concentrador piloto	79
4.2 Análisis	82
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Condiciones de operación en el tratamiento de lodos de estaño	27
Tabla 2. Ventajas y desventajas de un concentrador centrífugo	31
Tabla 3. Característica y composición del mineral aurífero	64
Tabla 4. Operacionalización de variables	65
Tabla 5. Parámetros de las pruebas del mineral a nivel de laboratorio	67
Tabla 6. Parámetros de las pruebas del mineral a nivel piloto	67
Tabla 7. Resultados de la caracterización física de relave	74
Tabla 8. Resultados del análisis granulométrico del mineral	75
Tabla 9. Recuperación en el concentrador de falcón a 6 L/min	76
Tabla 10. Recuperación en el concentrador de falcón a 8 L/min	76
Tabla 11. Recuperación en el concentrador de falcón a 12 L/min	77
Tabla 12. Recuperación en el concentrador de falcón a 20 L/min	77
Tabla 13. Balance metalúrgico en el concentrador falcón – peso 800 g y 5,80 g/t de Au	78
Tabla 14. Recuperación en el concentrador de piloto a 30 L/min	80
Tabla 15. Recuperación en el concentrador de piloto a 35 L/min	80

Tabla	16. Recuperación en el concentrador de piloto a 40 L/min	80
Tabla	17. Recuperación en el concentrador de piloto a 45 L/min	81
Tabla	18. Balance metalúrgico en el concentrador piloto	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Modelo genético de los depósitos epitermales	13
Figura 2. Mapa de operaciones mineras hasta 2017	15
Figura 3. Procesamiento de minerales mediante un concentrador centrífugo.	16
Figura 4. Mecanismos de separación	17
Figura 5. Principio de separación por medios pesados	18
Figura 6. Jig tipo Denver	19
Figura 7. Espiral humprey	20
Figura 8. Posición de las partículas de acuerdo a su masa volumétrica	20
Figura 9. Mesa de concentración	21
Figura 10. Esquema del principio de una taza separadora	24
Figura 11. Esquematización de una Centrifuga China	26
Figura 12. Centrifuga Gekko	28
Figura 13. Concentrador Knelson	34
Figura 14. Falcon modelo "B".	39
Figura 15. FALCON modelo "C"	40
Figura 16. Falcón modelo "sb" superbowl	42

Figura 17. Diagrama de flujo – falcón SB	43
Figura 18. Mesa concentradora Wilfley	44
Figura 19. Jig tipo "Denver mineral Jig" en un circuito de molienda	46
Figura 20. Esquema de las etapas del desarrollo de las pruebas	63
Figura 21. Preparación de muestras	64
Figura 22. Cuarteo de las muestras	65
Figura 23. Preparación mecánica del mineral	69
Figura 24. Concentrador centrífugo falcón	73
Figura 25. Curva de distribución granulométrico del relave de mina	75
Figura 26. Comparación de leyes de Au y recuperaciones obtenidas en los concentrados para el concentrador falcón	79
Figura 27. Comparación de leyes de Au y recuperaciones obtenidas en los concentrados para el concentrador piloto	81

## RESUMEN

El presente trabajo trata de la recuperación de partículas de oro libre mediante la concentración gravimétrica no tradicional, utilizando para las pruebas experimentales el concentrador centrífugo Falcon, que según la bibliografía es un equipo más versátil y productivo con respecto a equipos tradicionales como el Jig, manejando parámetros de operación como: campo centrífugo, espesor de flujo. El mineral aurífero utilizado para los estudios de investigación proviene de una de las zonas de Ite, determinando mediante los resultados del análisis químico, que los minerales de esta zona de la mina son económicamente rentables. Para el estudio se utilizaron mantas plásticas para la homogenización y cuarteo del mineral, sacando una muestra representativa a partir de 2,097 kg de mineral de oro de minera. Se consiguió resultados positivos, habiéndose incrementado la extracción del oro de un 35 % a 53,91 % logrando ampliar la producción hasta un 15 % obteniendo mejoras económicas para la zona de producción. El concentrador centrífugo Falcon es un gran aporte en la recuperación del mineral en las pruebas metalúrgicas.

***Palabras clave: Concentrador Centrífugo***

## INTRODUCCIÓN

La producción aurífera en el Perú, es cada vez más importante en el mundo. En el 2007 se produjo 171 toneladas de oro y se mantuvo en el 5º lugar del ránking mundial de los países productores de este metal. Para que nuestro país permanezca en este honroso puesto deberá producir este año más de 200 toneladas de oro. A pesar de nuestra tradición minera milenaria (principalmente de cobre-oro-plata) solo producimos, conforme estudios y aseveraciones de reconocidos geocientíficos de prestigio nacional e internacional, menos del 10 % del gran potencial. Sin embargo más del 90 % de la riqueza mineral permanece aún sin explotar en las entrañas del territorio nacional, principalmente en la inmensidad de nuestros Andes. El presente trabajo surge por el interés de desarrollar procedimientos tecnológicos que puedan servir especialmente para los pequeños mineros, cuyos recursos económicos son limitados, y poder brindar alternativas de desarrollo en cuanto a procesos de producción que contribuyan a la pequeña minería de nuestro país. El Concentrador centrífugo Falcon se emplea en las pruebas que realizamos para los procesos de extracción de oro y plata como método de pre concentración previa al proceso de flotación, en reciente desarrollo pero que resulta una posible alternativa a los minerales auríferos que presentan oro libre.

Mostrando resultados muy satisfactorios en compañías mineras de oro en el mundo como en Canadá como lo dio a conocer el Ing. Mark Van Kleek en su exposición de “Nuevas aplicaciones de concentración centrífuga” en el simposio de mineralurgia desarrollado en Tecsup, así como el éxito alcanzado en la mina Elvington en Zimbabwe donde mediante solo con el uso del concentrador centrífugo falcón se logra alcanzar hasta el 70 % de recuperación total de (Au) de la planta, también mostrando resultados positivos en minas de Australia como las minas de Ridgeway, Munni y Telfer.

En el Perú el concentrador centrífugo Falcon presenta también resultados satisfactorios como son los casos de la mina Marsa donde se emplea el equipo para la recuperación de oro de sus relaves, la mina de oro Sipan donde se utiliza el equipo para la misma función y en la mina Antapite de la compañía de minas buenaventura donde se emplea en conjunto con el circuito de molienda y clasificación para la recuperación de oro fino, pero sin duda el uso del concentrador centrífugo será de gran apoyo para la pequeña minería en el Perú.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Descripción del problema**

#### **1.1.1 Antecedentes del problema.**

Los concentradores centrífugos fueron desarrollados en la Unión Soviética en los años 50 y también fueron empleados en la China por veinte años para el tratamiento de relaves de menas de estaño y tungsteno. Solo después se prestó mayor atención al potencial de estos equipos en el Occidente. Hoy, estos equipos son muy utilizados en las diferentes partes del mundo gracias al avance de la tecnología estos equipos permiten una mayor recuperación de oro en menor tiempo y con bajos costos. Además, en estos tiempos en los cuales hay inquietud por el cuidado del medio ambiente, estos equipos son una gran alternativa para evitar la contaminación del medio ambiente.

Actualmente, la pequeña minería y la minería artesanal del oro es una actividad económica con una importancia creciente. Un problema serio derivado de esta actividad son las emisiones de mercurio. El uso no técnico e indiscriminado de mercurio en la

minería artesanal constituye un alto riesgo para el medio ambiente. Debido a su alto potencial tóxico, la contaminación con mercurio tiene efectos graves sobre la salud de la población minera, por su incorporación en la cadena alimenticia. La persistencia de mercurio en el ecosistema amenaza las posibilidades de desarrollo de futuras generaciones, por lo que hace posible presentar el estudio y el diseño de un concentrador centrífugo adecuado para la extracción de oro.

### **1.1.2 Problemática de la investigación.**

El método más importante de extracción de oro empleado en la actualidad es usando la cianuración, no siempre se puede usar el cianuro no siempre es posible usar positivamente en forma directa si no se tiene en cuenta las características del mineral o concentrado a tratar.

En el país la mayoría de los recursos minerales se explotan sin tener un conocimiento preciso del depósito (mineralogía, asociaciones de minerales al oro, grado de liberación etc), lo que genera bajas recuperaciones y pérdida productiva del depósito. Nagy (1966), establece que para que el oro se disuelva

completamente en soluciones alcalinas de cianuro, se deben satisfacer ciertos requerimientos, tales como:

- El oro debe estar como partículas discretas y limpias.
- Deben estar ausentes de impurezas que puedan inhibir la reacción.
- Se debe disponer de un adecuado suministro de oxígeno.
- Hasta donde concierne al segundo requerimiento, muchas minas de oro poseen constituyentes que se descomponen en soluciones de cianuro lo que ocasiona la aparición de compuestos, en solución, que pueden inhibir la reacción de disolución del oro.

## **1.2 Formulación del problema**

El estudio de investigación de la presente tesis, se justifica porque la minería pequeña minería tiene problemas de contaminación ambiental por el uso inadecuado del mercurio, la informalidad y la baja recuperación del oro. La investigación debe dar respuestas a la siguiente interrogante:

**¿Se optimizará el proceso de recuperación de oro, aplicando un concentrador centrífugo en la pequeña minería?**

### **1.3 Justificación e importancia del problema**

El estudio apunta a reducir la contaminación evitando el uso del mercurio y mejorar la productividad en la recuperación del oro usando concentradores centrífugos que son cien por ciento protectores del medio ambiente. El desarrollo de este trabajo de investigación tiene un enfoque especial en solucionar un problema ambiental con el estudio y diseño de un concentrador centrífugo.

### **1.4 Alcances y limitaciones**

La parte mecánica del equipo será posiblemente una limitación al principio del diseño del equipo, por lo que se buscará el apoyo de un mecánico. Difícil acceso a la pequeña minería.

### **1.5 Objetivos**

#### **1.5.1 Objetivo general**

- La optimización del proceso de recuperación de oro con una granulometría conveniente obtenida de un concentrador centrífugo para la pequeña minería.

#### **1.5.2 Objetivo específico**

- Estudio de los concentradores centrífugos para ser utilizados en la pequeña minería.

- Estudio y aplicación de los parámetros operativos de los concentradores centrífugos seleccionados.
- Optimización de un concentrador centrífugo para la recuperación de oro.

## **1.6 Hipótesis**

### **1.6.1 Hipótesis general.**

- Este proceso permitirá mejorar la recuperación del oro empleando concentradores centrífugos.

### **1.6.2 Hipótesis específico.**

- La recuperación mínima que se puede obtener en el tratamiento de los minerales de oro de la zona de Ite, por concentración gravimétrica en los concentradores Falcon es de 52 %.
- Los parámetros de operación más importantes que influyen en el rendimiento de concentradores Falcon son: campo centrífugo, % de sólidos y flujo

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes del estudio**

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 micras. 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 pascales (3 psi), para distintas granulometrías como: 52,25 %, 60,66 %, 67,13 % y 74,64 % - 200 malla. Los balances metalúrgicos indican que la mejor

prueba seleccionada es con una granulometría de 67,13 % - 200 malla, obteniéndose 300,20 g/t de concentrado, 33,66 % de recuperación y 51,59 de radio de concentración.

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 mallas, disminuye para granulometrías inferiores a

200 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 Saul (2013) en “Estudio de prefactibilidad 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 m<sup>3</sup>/día, con ley de corte de 0,22 g Au/m<sup>3</sup> y 1 130,00 US\$ la onza, por debajo de estos parámetros el proyecto no es factible.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 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).

### **2.2.2 Depósitos epitermales – mineralización de oro**

Son aquellos en los que la mineralización ocurrió dentro de 1 a 2 Km de profundidad desde la superficie terrestre y se depositó a partir de fluidos hidrotermales calientes (figura 1). Los fluidos se

estiman en el rango desde <373,15 K hasta unos 593,15 K y durante la formación del depósito estos fluidos hidrotermales pueden alcanzar la superficie como fuentes termales White y Hendsquist (1995). Los depósitos epitermales se encuentran de preferencia en áreas de volcanismo activo alrededor de los márgenes activos de continentes o arcos de islas y los más importantes son los de metales preciosos (Au, Ag), aunque pueden contener cantidades variables de Cu, Pb, Zn, Bi, entre otros. La mineralización de oro se encuentra distribuida principalmente en 3 franjas metalogénicas. La más joven es del Mioceno y tiene depósitos tipo epitermales de Au - Ag de alta, baja e intermedia sulfuración.

En el norte destacan actualmente las minas de Yanacocha, Lagunas Norte y Pierina y en el sur Orcopampa, Arasi y otras cerradas como Tukari y Santa Rosa. La franja del Cretácico superior se caracteriza por alojar depósitos de oro relacionado con intrusivos. En esta franja se encuentran las minas de San Juan de Chorunga, Caravelí, Orión, entre otras. La franja más antigua es del Carbonífero-Pérmico, los yacimientos son de tipo orogénico donde se encuentran operaciones como Parcoy, Retamas y Poderosa (INGEMET, 2017). Además de mineralización tipo epitermal,

destaca la presencia de oro en depósitos tipo placer, como la que ocurre en Madre de Dios (INGEMET, 2017).

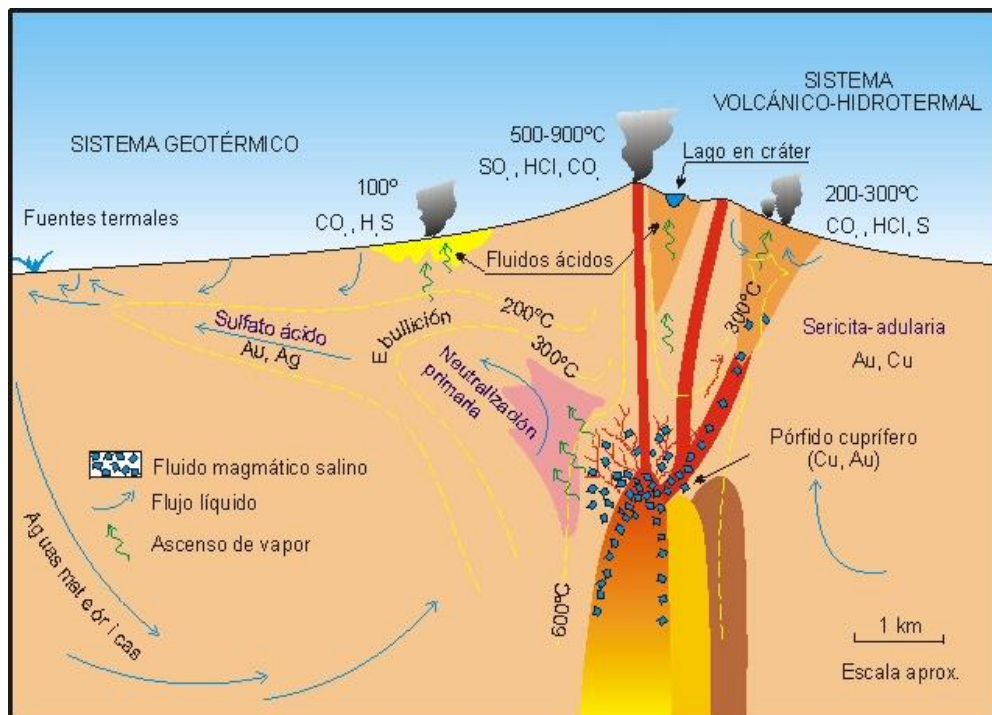


Figura 1. Modelo genético de los depósitos epitermales

Fuente: White y Hendsquit, 1995

## 2.2.3 Evolución histórica minera

### a. Minas en Operación

Hasta 1950 la explotación de minas peruanas correspondía a escalas de explotación pequeña y mediana. Es desde ese entonces cuando se marca una diferencia al poner en evidencia y explotación los grandes depósitos como Toquepala (cobre) y Marcona (hierro). En las décadas siguientes se va poniendo en marcha otros depósitos

grandes como Cuajone, Cerro Verde, Tintaya, Cobriza y ampliando operaciones como Cerro de Pasco, continuando además las explotaciones a escala mediana y pequeña. En la década del '80 se comienzan a descubrir los yacimientos epitermales de oro de baja sulfuración como Yanacocha y a partir de la década del '90, producto del “boom” de las exploraciones, se ubican más depósitos de oro y otros metales, poniéndose en marcha los yacimientos de Pierina, Lagunas Norte, Aruntani, Cori Huarmi, La Zanja, Breapampa, Pucamarca, Tambomayo, Shahuindo, entre otros. En cuanto a los depósitos de cobre, zinc, plata, se pone en marcha La Arena, la Virgen, Antamina, Cerro Lindo, Cerro Corona, Constanza, Toromocho. Muchas de las operaciones de la mediana minería, continúan su explotación como: Alpacay, Inmaculada, Capitana, Apumayo, San Rafael, Reliquias, Raúl Condestable, Carahuacra, Casapalca, Santander, Chungar, Huarón, Marcapunta Norte, Iscaycruz, Mañay, Uchucchacua, Quiruvilca, Poderosa, Alpamarca, Culebrillas, Retamas, Parcoy, Huanzalá, Pachapaqui, Raura, Atacocha, El Porvenir, Colquijirca, Morococha, San Vicente, Julcani, Catalina Huanca, Orcopampa, entre otros (INGEMET, 2017).

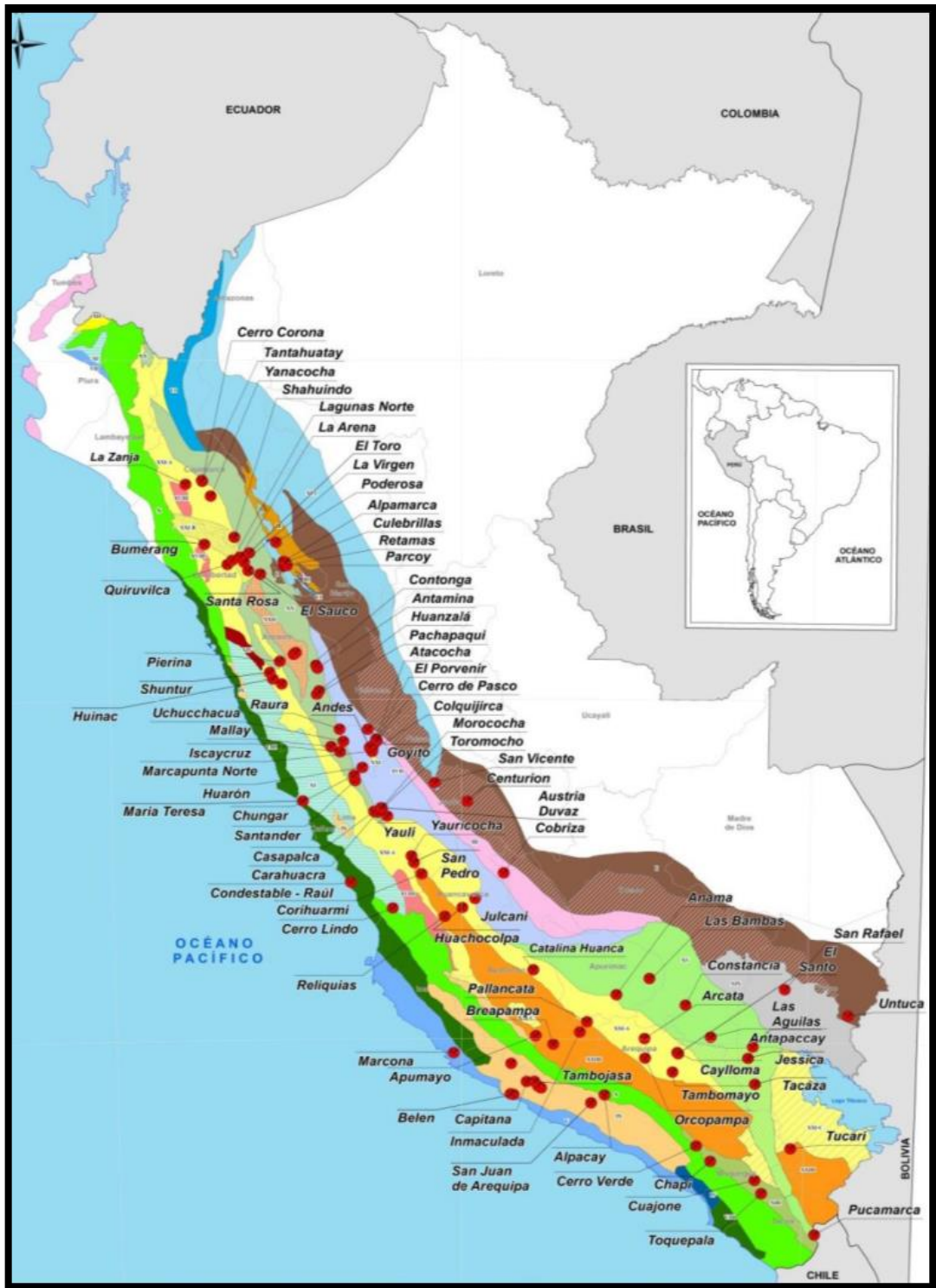


Figura 2. Mapa de operaciones mineras hasta 2017

Fuente: INGEMET, 2017

## 2.2.4 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, como se muestra (Ver Figura 3).

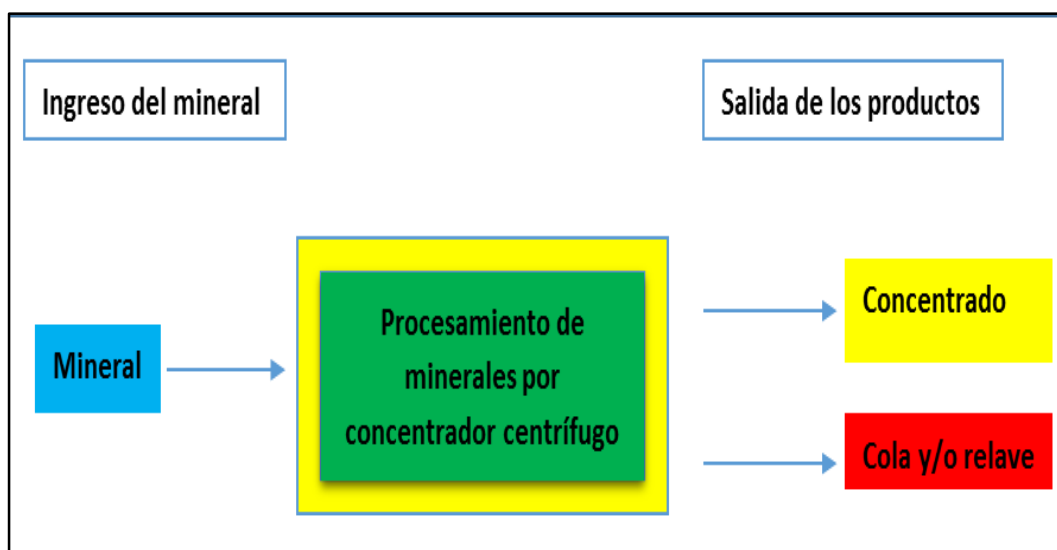


Figura 3. Procesamiento de minerales mediante un concentrador centrífugo.

Fuente: Elaboración propia.

Los equipos y maquinarias de concentración por gravedad son divididos en cuatro grandes grupos, cada uno de estos utilizan principios de separación diferentes (Armando, 2006). Estos principios se ilustran en figura 4.

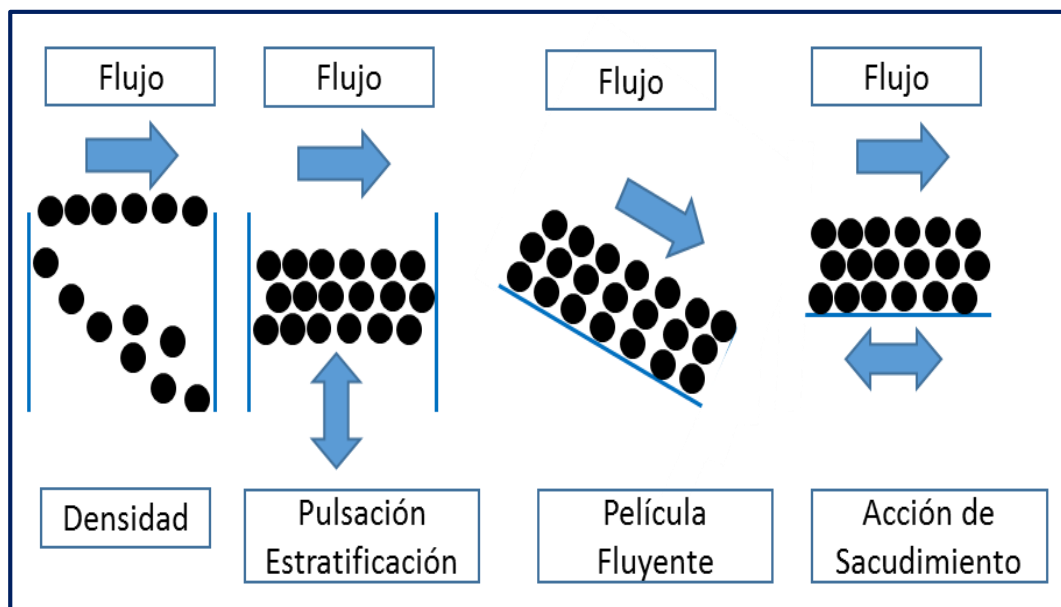


Figura 4. Mecanismos de separación

Fuente: Armando A., 2006

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).

**a. 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. Entre los equipos de este grupo podemos citar a los de la separación por medios pesados (figura 5) (Armando, 2006).

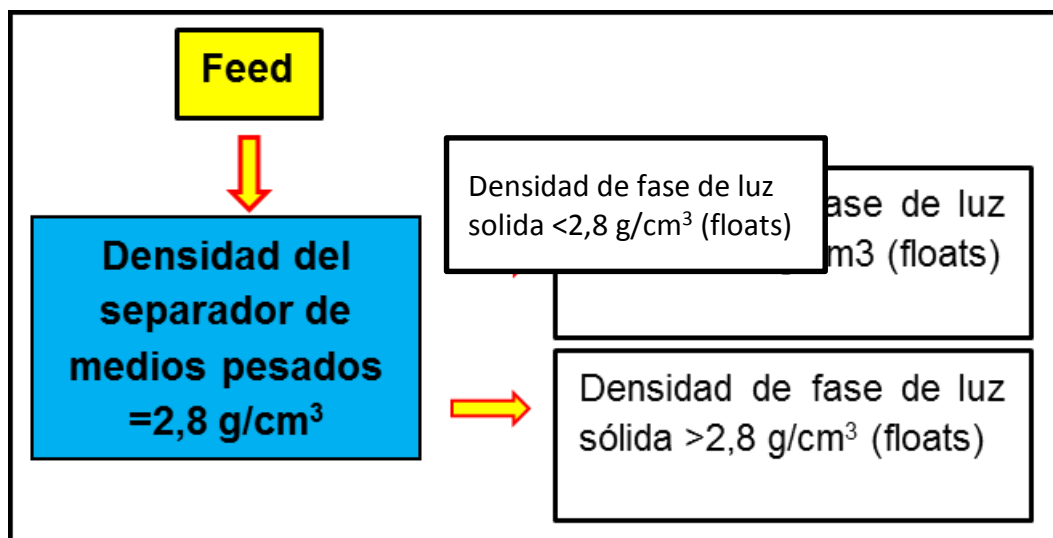


Figura 5. Principio de separación por medios pesados

Fuente: Elaboración propia.

**b. 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).

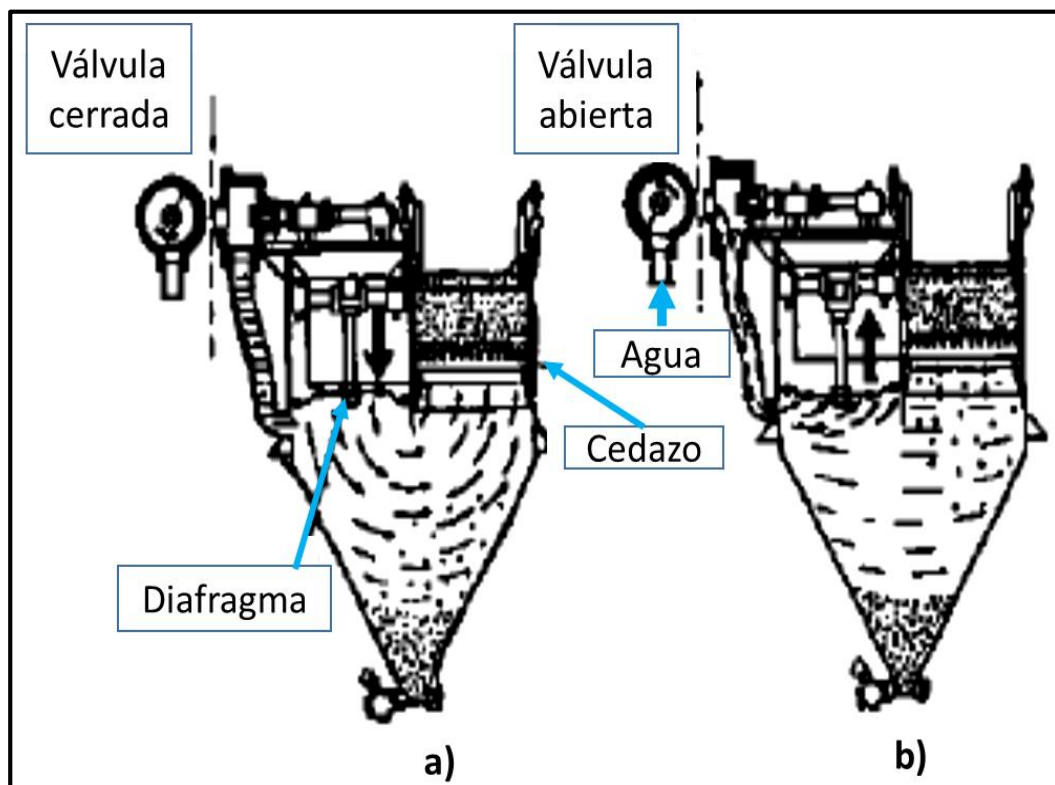


Figura 6. Jig tipo Denver

Fuente: Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales, 2006

**c. 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). El espiral Humprey (figuras 7 y 8) (Cano, 1991).

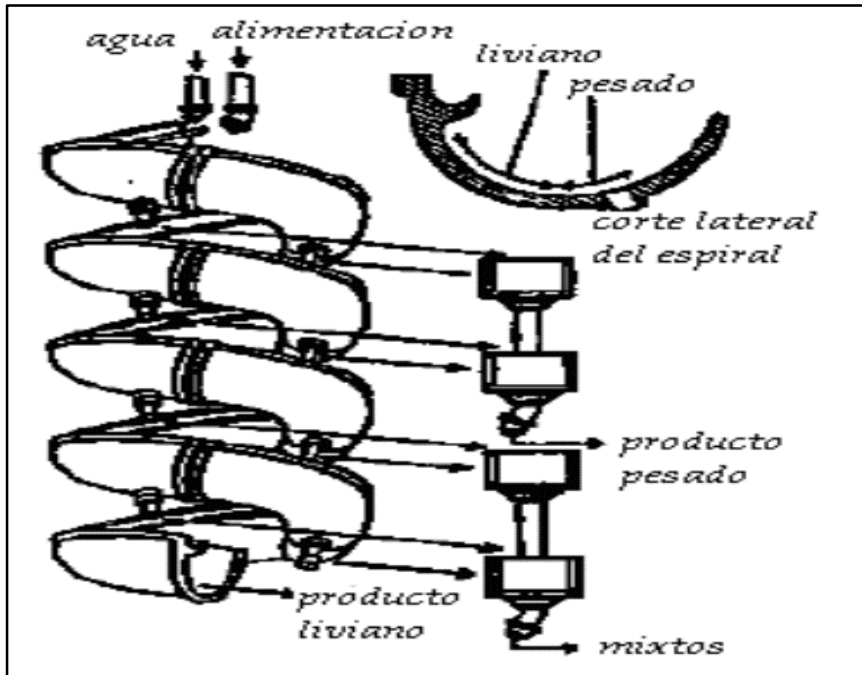


Figura 7. Espiral humprey

Fuente: Gill, 1991

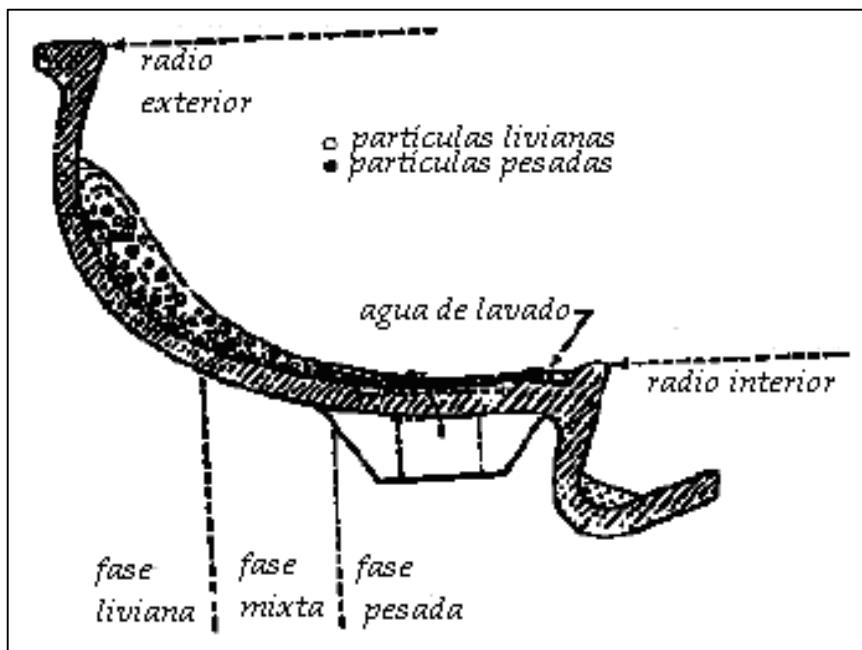


Figura 8. Posición de las partículas de acuerdo a su masa volumétrica

Fuente: Gill, 1991

**d. 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 (figura 9) (Armando, 2006).

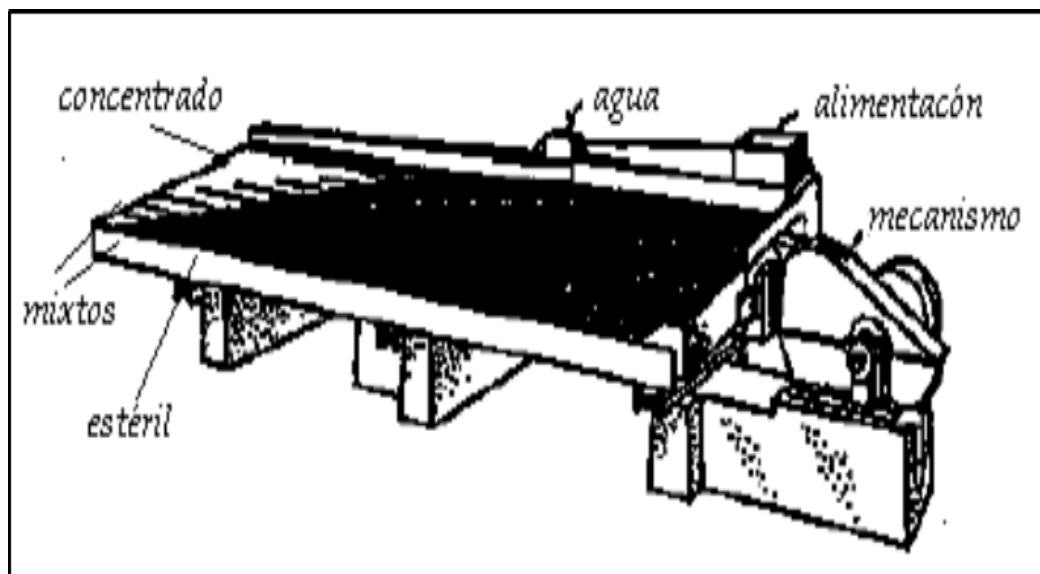


Figura 9. Mesa de concentración

Fuente: Taggart, 1968

### 2.2.5 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).

#### **2.2.6 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, (figura 10) de acuerdo con la siguiente expresión, Salas (2000).

$$F = \frac{W}{G} r W^2 \quad [1]$$

Donde:

- F = Fuerza centrífuga (G)
- W = Peso de la partícula (g)
- r = Radio de curvatura o radio de giro (cm)
- G = Aceleración de la gravedad (981 cm/seg)
- $W^2$  = Velocidad angular (rad/ seg)

La fuerza que actúa sobre un líquido al interior de una centrífuga a diferentes profundidades dentro de las paredes del tazón da como resultado una presión líquida unitaria que se expresa por:

$$P_1 = \frac{\delta}{2G} W^2 (r_2^2 - r_1^2) \quad [2]$$

Donde:

- $\delta$  = densidad del líquido
- $r^2$  = radio en un punto cualquiera para el que se calcula la presión
- $r^1$  = radio de la superficie líquida exterior

La posición de esa zona neutra constituye un factor importante para los resultados de funcionamiento de la centrifuga. Cuando la zona neutra está cerca del centro de la centrifuga, 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 (Salas, 2000).

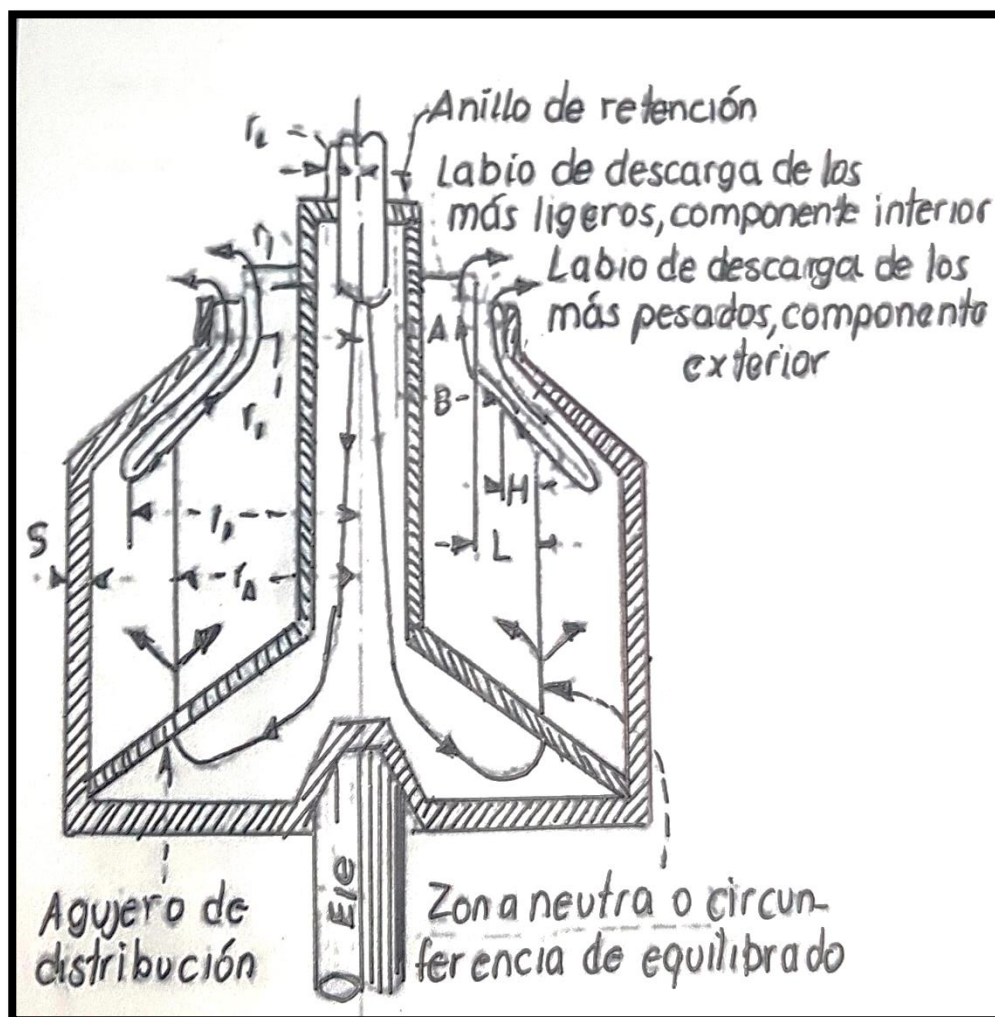


Figura 10. Esquema del principio de una taza separadora  
Fuente: Salas, 2000

Cuando la zona neutra está cerca del diámetro mayor del tazón, el efecto es mayor sobre el componente más ligero y esa construcción se emplea para separaciones especiales como la purificación de aceites. 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:

**a. Centrifugador chino**

La centrífuga china (figura 11) 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 preconcentrado 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 por ciento de sólidos, y la segunda tobera se utiliza para introducir agua de lavado (Salas, 2000).

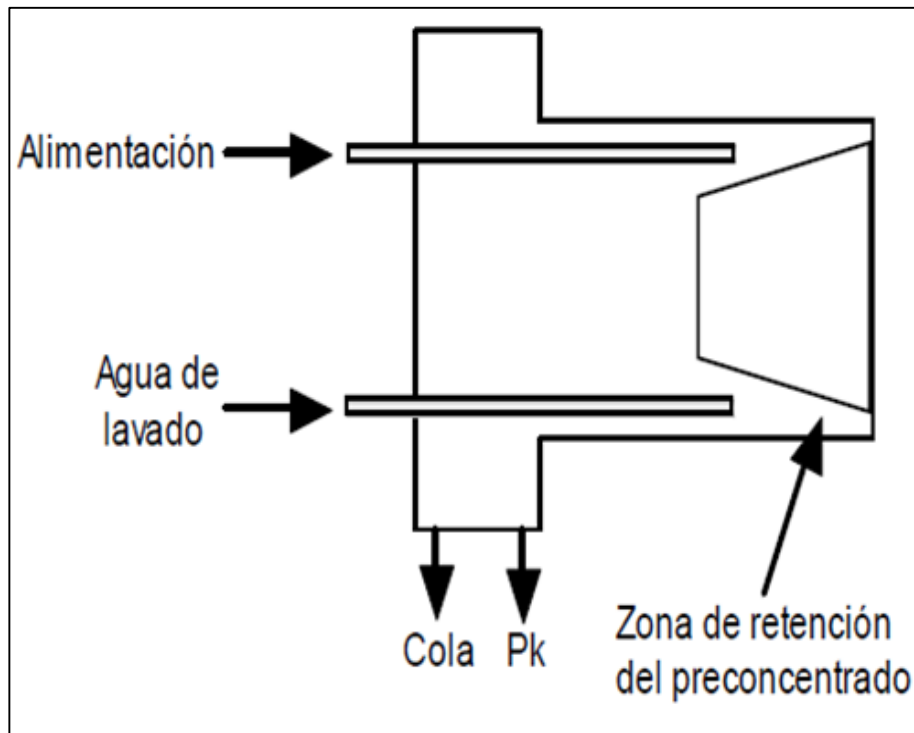


Figura 11. Esquematización de una Centrífuga China  
Fuente: Lou y Lin, 1981

Se tiene conocimiento de que estos equipos centrífugos de lecho sedimentado han dado resultados muy interesantes para el pre concentración y concentración de minerales de estaño en granulometría muy fina. En tabla 1 se muestran los resultados del tratamiento de minerales estanníferos y en tabla 1, sus condiciones de operación (Salas, 2000).

Tabla 1.

Condiciones de operación en el tratamiento de lodos de estaño

Etapa	Tamaño de partícula (mm)	Volumen alimento (L/min)	Densidad de pulpa (% solidos)	Ciclo de operación (s)	Tiempo de alimento (s)	Tiempo de descarga (s)
Rougher	0,074 – 0,01	90 – 100	20 - 25	210	180	30
Cleaner	0,074 - 0,01	70,80	15 - 20	210	180	30

Fuente: Taggart, 1968

#### b. 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 (estéril) (Armando, 2006).

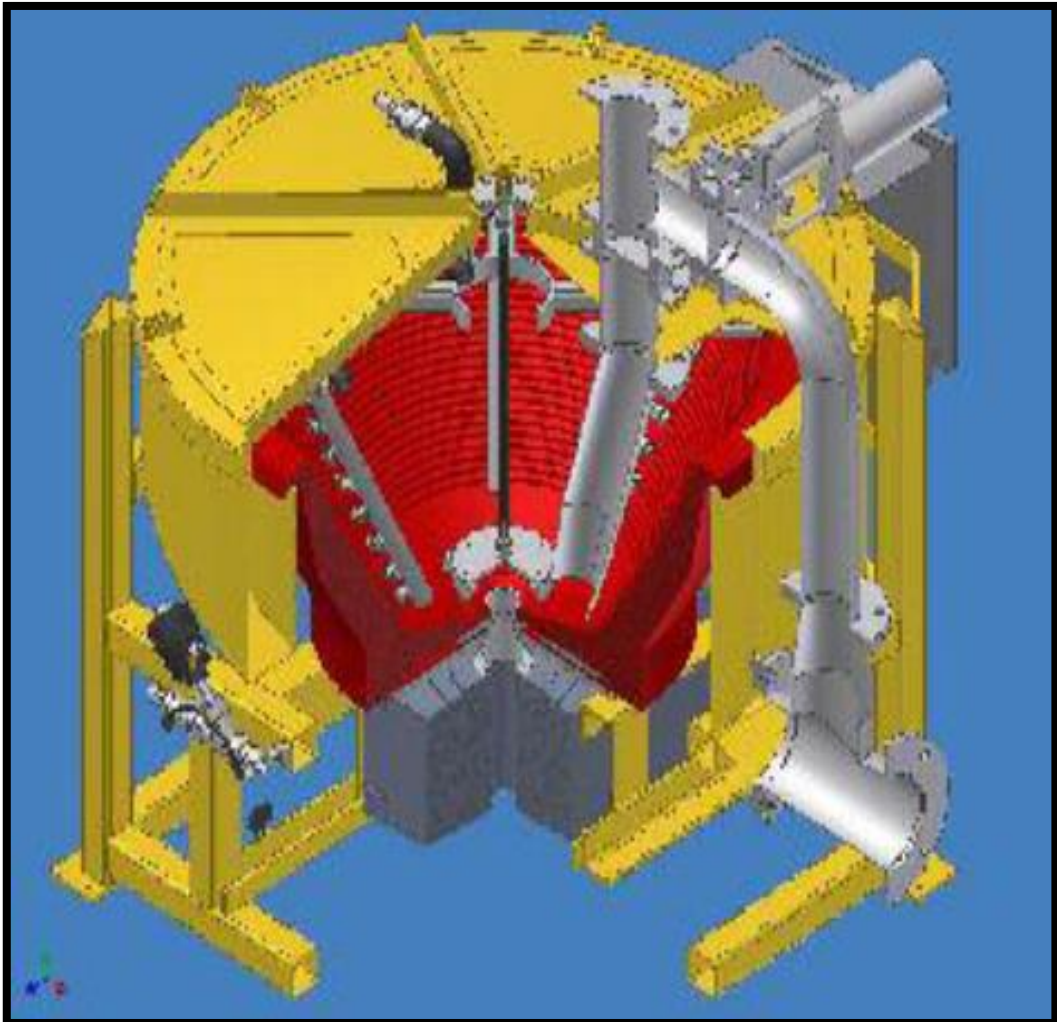


Figura 12. Centrífuga Gekko

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).

### **2.2.7 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 ratios 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 (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 Falcon

y 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.

*Tabla 2.*

*Ventajas y desventajas de un concentrador centrífugo*

<b>Ventajas</b>	<b>desventajas</b>
Buena recuperación de oro fino/ultrafino y laminado	Requiere agua limpia y de presión constante.
Alto grado de enriquecimiento	Equipo relativamente costoso
Seguridad contra robo	Difícil para manejar
	Equipo no apto para producción local
	Mala recuperación de sulfuros auríferos

Fuente: Gobierno regional de Arequipa autoridad regional ambiental

Otros problemas con las centrífugas son los siguientes:

- **Posibilidad mínima de recuperar minerales pesados acompañantes.**

Si el concentrador centrífugo es utilizado para el pre concentración (como equipo único), todos o casi todos los minerales acompañantes valiosos se perderían. Este es el caso de las minas primarias, donde se encuentran presentes sulfuros valiosos. Aquí disminuye la recuperación total de oro utilizando centrífugas en el pre concentración, ya que cierta cantidad de oro se presenta diseminada en los sulfuros (Azanza, 1994).

- **Operación sin posibilidades de supervisión.**

La mayoría de las centrífugas en operación están completamente cerradas, y los disturbios en su interior son difíciles de detectar (en contraste con la mesa concentradora y las espirales). Un ajuste incorrecto del concentrador centrífugo (presión de agua inyectada irregular o modificada debido a una falla en el bombeo) puede llevar a una recuperación nula (igual a cero), sin que el operador lo note. En la mayoría de los casos, sólo en el momento en que el recipiente de concentrado es vaciado se puede observar qué tan exitosa ha sido la operación con la centrífuga (Azanza, 1994).

**a. 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).

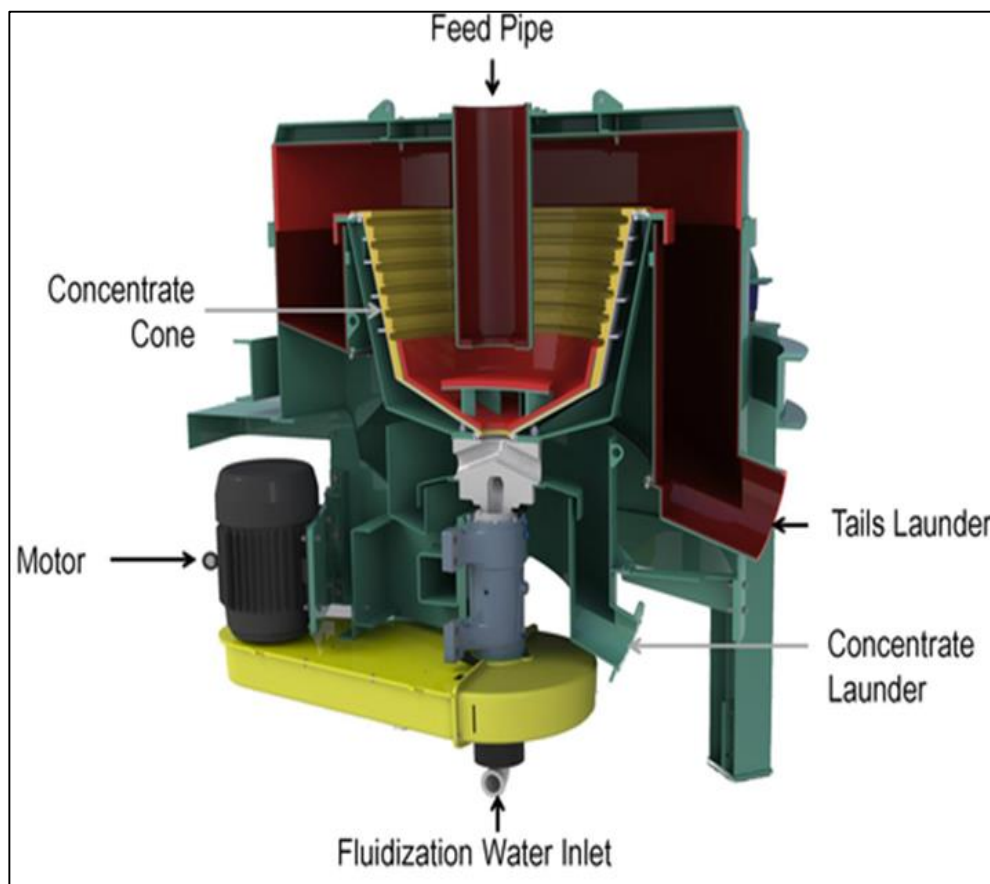


Figura 13. Concentrador Knelson  
Fuente: Consep Engineering Innovation

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 no contaminante 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.

**b. Concentrador centrífugo Falcon**

El principio de separación del concentrador Falcon 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 Falcon 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, etc. Puede asemejarse a un cono Reichert centrífugo invertido cuya principal diferencia es que la alimentación se realiza por el centro del equipo (McAlister, 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 (McAlister, 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 (McAlister, 1989).

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.

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).

A continuación, describimos las características más importantes de algunos modelos de Centrifugadores Falcón):

- **Falcón modelo “B”:**

Diseñado en los años 60, fue probado inicialmente en 1981, su diseño siguió la metodología de prueba y error, acondicionándole con partes de características exclusivas como un impulsor para direccionar la alimentación a la pared, un cono con un ángulo de inclinación de alrededor de 14° y gomas en la superficie (Ticona, 2005). El modelo Falcon B es el más antiguo y simple para procesar mineral con granulometría fina y trabaja con densidades de pulpa bajas.

El concentrado acumulado en la pared lisa del rotor es periódicamente lavado a través de pequeños orificios conectados a una cavidad detrás del rotor, después de un intervalo cuando para el equipo.

En esta operación una cantidad de material estéril es retenido debajo de la delgada capa del concentrado, el porcentaje de este material depende de las características de la alimentación lo que delimita la aplicación de estas unidades.

El control de las revoluciones de giro del rotor y la válvula de alimentación Inter-enlazados a otros dispositivos disminuyeron enormemente la puesta en marcha de la transmisión.

Para la limpieza, la alimentación se interrumpe y el rotor se detiene, entonces mientras se reduce la velocidad del rotor se realiza la limpieza adicionando pequeñas cantidades de agua.

El tiempo total de apagado de la unidad es de 30 – 40 segundos (Ticona, 2005). Los modelos falcón B está siendo adaptado para procesar materiales con baja ley y alto contenido de metales pesados.



Figura 14. Falcon modelo "B".

Fuente: Sepro mineral systems.

- **Falcón modelo “C”:**

Las necesidades de la industria minera, que operan generalmente con grandes tonelajes de alimentación fue el principal impulso para desarrollar una unidad continúa dando lugar a los modelos C. Estos equipos pueden ser aplicados a una amplia gama de procesamiento de minerales con granulometrías finas para obtener concentrados en cantidades reducidas y recuperación elevada. Produce un concentrado en forma continua que puede llegar a 40 % de masa respecto a la alimentación (Armando, 2016).



Figura 15. FALCON modelo “C”  
Fuente: SEPRO mineral systems

El objetivo principal de esta serie es maximizar la recuperación y disminuir la masa que ingresa al proceso subsiguiente. En el equipo la carga es sometida a fuerzas centrifugas de hasta 300 “Gs” dando lugar a una segregación de las partículas de acuerdo a su peso específico mientras discurren por la pared lisa del rotor. El concentrado es retenido en la cavidad del rotor de donde periódicamente (de 5 a 30 segundos) es evacuada por toberas de abertura variable controladas por un compresor, las colas son descartadas por la parte superior del rotor en forma continua, no se requiere la adición de agua al proceso (Armando A., 2016). Sus principales ventajas es la capacidad de la unidad de hasta 100 T/h, alto campo gravitatorio (hasta 300 G) que permite la recuperación de partículas muy finas y costos de operación extremadamente bajos y la única desventaja es el uso de agua muy alta.

- **Falcón modelo “sb” superbowl**

Constituido también por un cono truncado que, a diferencia de los anteriores modelos, está provisto de dos a tres rifles en la parte superior del rotor. Es una combinación de los anteriores modelos, la zona de migración del falcón fue conservada, pero en la zona de retención se observó la necesidad de generar ilustración para una

mejor recuperación de oro grueso, por lo cual requiere la adición de agua a presión. Dos cilindros concéntricos en la parte central son utilizados para generar presión de agua, donde el segundo cilindro cuenta con agujeros pequeños en la pared interna cuyas hendeduras tienen el objetivo de distribuir el agua sobre la cama (Ticona, 2005).

La adición de agua en contra presión por las ranuras presentes en la zona de concentrado, facilita el movimiento de las partículas livianas y de esta manera sólo son retenidas las partículas más pesadas. La limpieza se realiza con un pequeño volumen de agua, interrumpiendo para ello la alimentación y deteniendo el rotor.



Figura 16. Falcón modelo "sb" superbowl  
Fuente: Falcón concentrators, 1987

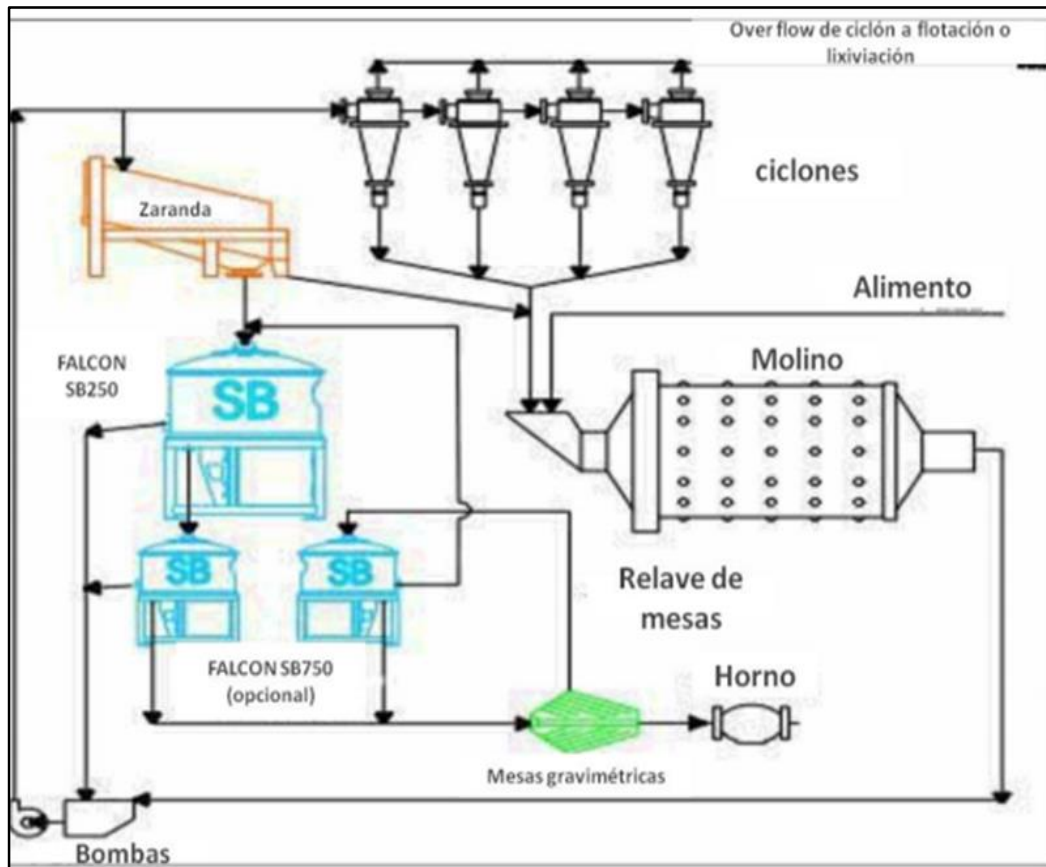


Figura 17. Diagrama de flujo – falcón SB  
Fuente: Elaboración propia

## 2.2.8 Centrífugas de lecho fluidizado pulsante

### a. 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 17) 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 enriado (Bruno, 2012).



Figura 18. 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 enriado (Bruno, 2012).

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

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).

**b. 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.

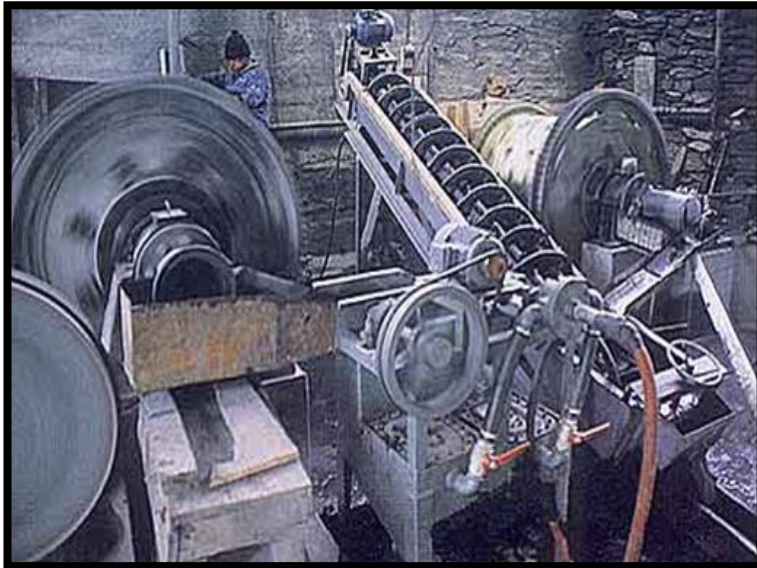


Figura 19. Jig tipo "Denver mineral Jig" en un circuito de molienda  
Fuente: Elaboración propia.

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).

### **2.2.9 Variables de operación del equipo Falcon**

Como anteriormente lo enunciamos, los equipos falcón poseen una simplicidad en su operación, lo que reduce enormemente los parámetros operacionales, simplificando su control. Entre los parámetros de mayor influencia en la eficiencia de separación están:

#### **a. Parámetros de operación**

- La granulometría de la alimentación.
- La Fuerza centrífuga.
- Caudal de alimentación.
- Densidad de la pulpa.
- Contrapresión de agua.

#### **b. Granulometría de alimentación**

Al igual que en cualquier proceso de beneficio de minerales, el tamaño de grano es de vital importancia para determinar la eficiencia operacional del equipo, así como para establecer el grado de liberación del mineral de valor económico. Para coadyuvar a este fin se realiza la cuantificación de la distribución granulométrica.

Como ya lo mencionamos anteriormente el Concentrador Centrífugo Falcon es utilizado generalmente para incrementar la recuperación de valores en granulometría fina, los cuales, en procedimientos convencionales, se pierden conjuntamente el material de descarte final (colas). Por ello, estos equipos son usados principalmente en la etapa de recuperación de minerales pesados a partir de colas finales de procesos gravimétricos o para obtener un pre-concentrado.

Consecuentemente la ley con la que trabajan estos equipos son relativamente bajas, es decir, están en el orden de 0,5 a 10 % peso respecto al total de la carga sometida al proceso, cuyo tamaño de grano está en un rango de 1 mm hasta 6 micrones (Armando, 2016).

Una de las principales características del modelo Falcon SB es su eficiencia en la recuperación de menas de tamaño de partícula inferiores a 325 mallas de la serie Tyler, cuya separación es función de las características físicas de las partículas tales como:

- Forma
- Peso específico
- Componentes de la mena
- Grado de pureza, etc.

Por lo expuesto en la teoría de la concentración centrífuga, el tamaño de grano está directamente relacionado con la velocidad de sedimentación, que a su vez está influenciado por la fuerza centrífuga, por lo cual es importante analizar con detalle la influencia del tamaño de grano de la alimentación con respecto a la recuperación de valores (Armando, 2016).

**c. Fuerza centrífuga**

La separación de las partículas finas de valor económico, en los equipos centrifugadores es función directa de la fuerza centrífuga aplicada. Además de que su capacidad puede ser ampliada incrementando el campo centrifugo. La teoría nos indica que a mayor fuerza centrífuga mayor será la eficiencia de separación, por lo cual es importante estudiar la influencia de esta variable (Armando A., 2016).

**d. Caudal de alimentación**

Una de las principales características del concentrador centrífugo falcón es que el área de contacto de la partícula (área de concentración) se relaciona directamente con el diámetro del equipo, es decir con la capacidad del mismo, por lo cual es necesario determinar la cantidad de pulpa a ser procesada. La velocidad de

alimentación está relacionada con la densidad de la pulpa, la granulometría de alimentación, la fuerza centrífuga y la contrapresión de agua, sin embargo, en la práctica esta variable no siempre puede ser modificada por lo expuesto, además de estar relacionado con la capacidad de procesamiento de la planta, en particular con las máquinas utilizadas en el circuito que involucra el proceso aplicado (Armando, 2016).

**e. Densidad de la pulpa de alimentación**

En los equipos centrífugos la densidad de la pulpa puede fluctuar desde 25 hasta el 60 % de sólidos en peso, dependiendo exclusivamente del tonelaje de alimentación al equipo.

En el modelo falcón SB la densidad de pulpa puede variar de 25 a 40 % sólidos. Una densidad de pulpa elevada conducirá a productos de baja ley, en cambio una baja densidad podría traducirse en una baja recuperación. Esta variable, sin embargo, no es determinante y puede permanecer invariable siempre que el volumen de alimentación se mantenga relativamente constante.

**f. Contrapresión de agua**

Este factor es importante, pues está relacionado con la fluidización y consecuentemente repercute de manera directa en la recuperación y la ley del pre-concentrado. La presión de agua alimentada al equipo no debe ser elevada cuando se procesan partículas finas, porque puede originar arrastre de partículas pesadas de valor económico a las colas.

Por lo general esta variable debe mantenerse en rangos establecidos, lo suficientemente adecuado para originar la estratificación de la cama que permita retener las partículas pesadas (Armando, 2016).

**2.2.10 Variables de operación del equipo jigs**

Los relacionados a la alimentación:

- Tipo de alimentación
- Densidad de alimentación (relacionado con el flujo volumétrico)
- Caudal de alimentación (tonelaje)
- Distribución de tamaño de la alimentación
- Gravedad específica entre los minerales a ser separados

Los relacionados con los parámetros de la máquina

- Velocidad de giro (campo gravitacional inducido)
- Frecuencia de pulso
- Amplitud de pulso (referido a la amplitud del golpe)
- Tipo de cama, gravedad específica y distribución de tamaño
- Profundidad del lecho de la cama
- Tamaño de apertura de la criba
- Caudal de adición de agua y presión

Para comprender adecuadamente el efecto de cada uno de los parámetros de la maquina es necesario describir lo siguiente:

**a. Cama (Ragging)**

Material granular sólido, aproximadamente con 40 % de tamaño mayor que la abertura de la rejilla de la criba, con una gravedad específica que esté entre el concentrado y los minerales denominados como ganga (cola) (Armando, 2016).

**b. Velocidad de giro**

Velocidad de rotación del rotor que gira conjuntamente la criba. Usualmente se expresa en revoluciones por minuto (rpm).

**c. Frecuencia de pulso**

Número de pulsaciones por minuto de cada brazo de pulso individual debido al accionamiento del motor de pulsación. Generalmente es expresado como pulsos por minuto (ppm).

**d. Pulso efectivo**

Número real de pulsos por minuto que imprime cada brazo de pulsación, debido al efecto combinado del motor de rotación y el motor de pulsación. Es la suma de la velocidad de giro y la frecuencia de pulso. Este efecto es debido a las direcciones de giro y pulso rotando en direcciones opuestas (Armando, 2016).

**e. Amplitud de pulsación**

Desplazamiento que ocurre en la superficie de cada pulso (golpe).

**f. Agua de pulsación**

El agua de pulsación es suministrada a la criba a través de la tubería central de alimentación de agua, que se distribuye igualitariamente a cada una de las tolvas del Jig Kelsey vía un distribuidor de agua central. El agua ingresa por el fondo de cada recipiente (tolva) a través de una tobera de 2 a 8 mm de diámetro,

dependiendo del modelo del jig. El agua de pulsación actúa como un medio por el cual los brazos de pulso se mueven y esto es convertido en la dilatación del lecho (Armando, 2016).

**g. Toberas de agua**

Estas toberas de alimentación de agua de pulsación, permiten regular el volumen y la presión del agua de pulso que entra en las tolvas de recepción del concentrado.

**h. Spigots del concentrado**

Los *spigots* del concentrado controlan el volumen de concentrado que puede fluir a través de las tolvas de recepción de concentrado. En los equipos, los *spigots* son construidos de material sintético.

**i. Portadores de spigots de concentrado**

Estos portadores de *spigots*, como su nombre indica, tienen la facultad de retener el *spigot* de descarga de concentrado. Estos portadores se ajustan a la tolva mediante roscas que permiten ser removidos para la limpieza de los *spigots* (toberas).

**j. Cedazo de la criba**

El cedazo de la criba tiene una configuración cilíndrica y diseñada con aberturas. Este cedazo está inserto al ras dentro del molde de la criba, sellando la base y cada divisor de la tolva. Su función primaria es retener la cama (ragging) mientras permite la concentración de los materiales pesados, para que estos pasen a lo largo y dentro de las tolvas del concentrado (Armando, 2016).

**2.2.11 Tecnologías limpias aplicadas a la recuperación de oro**

Las Naciones Unidas definen a la producción más limpia - PML 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 - PML 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).

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.

### **2.2.12 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).

## **2.3 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 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. Hidrociclón**

La clasificación es el proceso de separación de partículas finas de las gruesas. En las operaciones de clasificación de tamaños de partículas, el equipo básico es el hidrociclón (ciclón).

**d. Cajón de pulpa**

El cajón de pulpa es el depósito de material que sale de la descarga del molino de bolas.

**e. Medios de molienda**

La cantidad de bolas que se coloca dentro de un molino de bolas mayormente depende de la cantidad de energía disponible para mover el molino, generalmente las cargas normales de bolas varían entre 30 % y 35 % del volumen interior del molino.

**f. 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.

**g. Concentradores centrífugos**

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

**h. 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.

**i. Concentrador Falcon**

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

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Tipo y diseño de investigación**

##### **3.1.1 Tipo y nivel de investigación**

La presente tesis de investigación reúne las condiciones metodológicas de una investigación aplicada, debidamente, se aplicaron conocimientos sobre proceso de metalurgia extractiva, a fin de aplicarlas en las pruebas usando gravimetría.

De acuerdo al estudio de la investigación, se utilizará el nivel de estudio descriptivo – experimental.

##### **3.1.2 Diseño de la investigación**

Para la ejecución del presente trabajo de investigación en la aplicación de pruebas a nivel de laboratorio usando concentrador Falcon y a nivel piloto usando el concentrador modelo Knelson para minerales oxidados que contiene oro, se considerara el siguiente esquema:

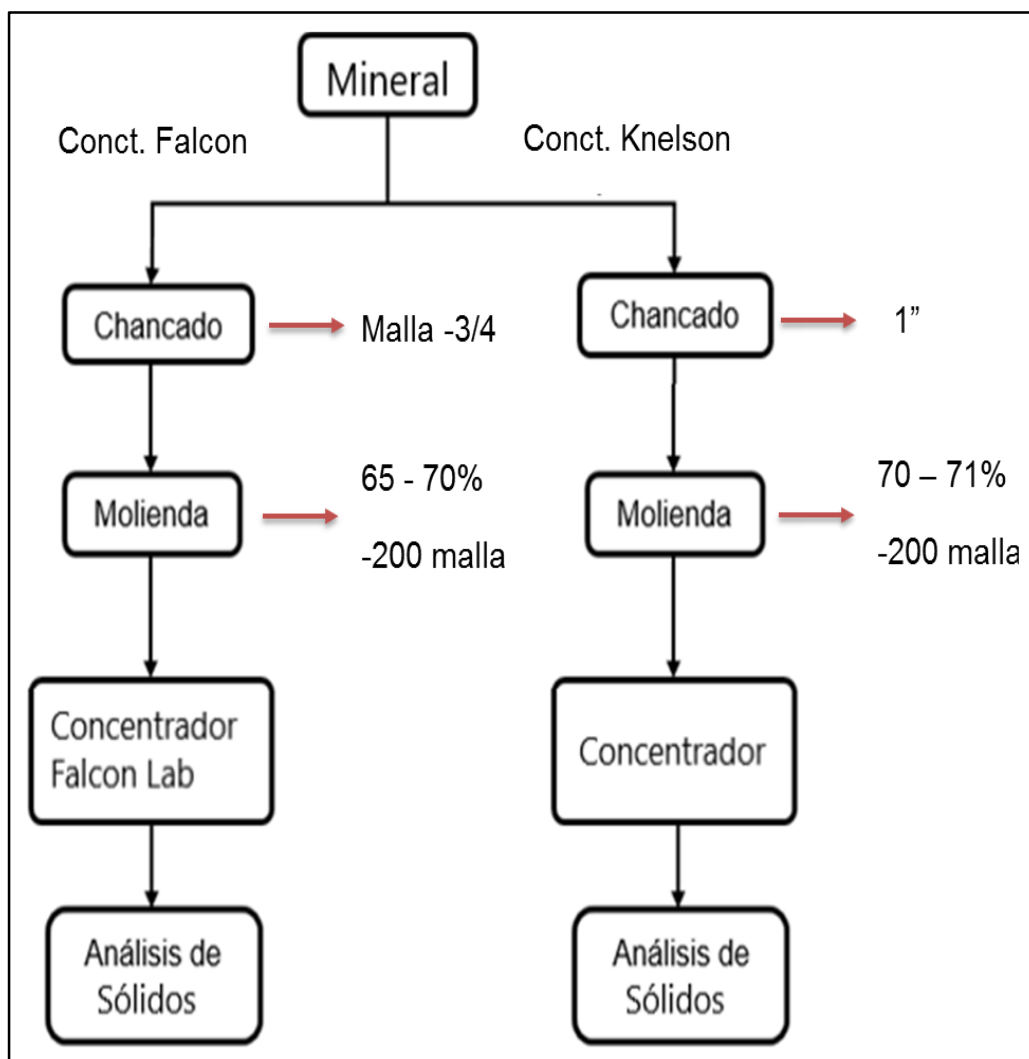


Figura 20. Esquema de las etapas del desarrollo de las pruebas

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Población y muestra de estudio

La población es mineral de óxido aurífero provenientes del denuncia minero Manuela Ite.

Las muestras a estudiar son minerales que contienen oro que se evaluó mediante procesos de concentración gravimétrica a nivel de laboratorio y piloto, las variables de operación serán según los resultados logrados en nivel de laboratorio.

Tabla 3.  
Característica y composición del mineral aurífero

Contenido del mineral	Cantidad en %
(Magnetita) $Fe_3O_4$	50 %
(Hematita) $Fe_2O_3$	15 %
Sílice	30 %
Otros	5 %
Total	100 %

Fuente: Elaboración propia.



Figura 21. Preparación de muestras  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 22. Cuarteo de las muestras  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Operacionalización de variables

Se aplicará el balance metalúrgico, a fin de procesar e identificar la influencia de variables. En el análisis de datos los balances metalúrgicos permitirán identificar y optimizar las variables.

Tabla 4.

Operacionalización de variables.

<b>Variables</b>	<b>Indicadores</b>
Dependiente: Mejorar la optimización de recuperación de oro.	Granulometría o tamaño de partícula.
Independiente: Uso de un concentrador centrífugo	% de recuperación de oro.

Fuente: Elaboración propia.

### **3.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos**

La técnica que se aplicó en la elaboración de la tesis fue experimental directa, porque existe una relación directa entre la ley de oro en el mineral y la recuperación después del proceso de concentración.

### **3.5 Procedimiento y análisis de datos**

El objetivo principal de realizar las pruebas experimentales es la recuperación de partículas de oro libre, respecto a equipos de laboratorio concentrador falcón y el concentrador tradicional como es modelo Knelson, manejando parámetros de operación como: campo centrífugo, flujo (porcentaje de sólidos).

En primer lugar, se llevaron a cabo las pruebas de moliendabilidad para determinar el tiempo necesario para la molienda del mineral a diferentes grados. Se consideró los siguientes tiempos de molienda 15, 25, 30 y 35 minutos. Las pruebas a que se realizaron son las siguientes: concentración gravimétrica de mineral de zona aurífera de Ite, Se toma una muestra representativa de mineral procedente de esta zona, se hace una prueba de concentración gravimétrica.

Tabla 5.

Parámetros de las pruebas del mineral a nivel de laboratorio

Características	Cantidades	Tipo de mineral	Procedencia
Peso mineral	800 g	Oxido	Denuncio Minera
Ley mineral	5,8 g/t		
Granulometría	M 70 %		
Flujo de agua	6, 8, 12 y 20 L/min		

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.

Parámetros de las pruebas del mineral a nivel piloto

Características	Cantidades	Tipo de mineral	Procedencia
Peso mineral	2000 kg	Oxido	Denuncio Minera
Ley mineral	5,8 g/t		
Granulometría	M 70 %		
Flujo de agua	30, 35, 40 y 45 L/min		

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.5.1 Instrumentos y equipos.

#### Reactivos

- Nitrato de Plata ( $\text{AgNO}_3$ )
- Harina de sílice
- Litargirio
- Carbonato de sodio
- Bórax
- Agua destilada

## **Equipos**

- Molino de bolas
- Ro-Tap
- Tamiz de la serie Tyler
- Tanques agitadores
- Concentrador Falcón y concentrador piloto
- Balance Analítica
- Horno
- Balanza analítica

## **Materiales**

- Buretas
- Papel de filtro
- Pipeta
- Embudo
- Botellas de plástico
- Vaso de precipitado
- Probeta
- Tubos de ensayo

### 3.5.2 Procedimiento experimental.

El material usado para las pruebas metalúrgicas es proveniente del denuncia minero Manuela - Ite con una granulometría de 1" (2,54 cm), con un peso de 10 kg de relave y es de tipo óxidos. Para la obtención de una muestra representativa se procedió a realizar de la siguiente manera:

#### a. Preparación mecánica de la muestra

Se hace las pruebas del mineral a nivel de laboratorio y piloto, previas etapas de: chancado y molienda. Hasta llevarlo a un tamaño de partícula de 65 - 70 % -200 mallas.

Se separó una muestra de 800 gramos y 2 000 kilogramos a partir de 10 000 kilogramos, usando cargador frontal, mediante métodos de cono y cuarteo.



Figura 23. Preparación mecánica del mineral  
Fuente: Elaboración propia.

**b. Pruebas de concentración gravimétrica concentrador falcón**

Pruebas de concentración gravimétrica usando mineral fresco de la descarga del molino de bolas de 12" x 12" (30,48 cm x 30,48 cm) y de 3' x 4' (7,62 cm x 10,16 cm), tanto en el concentradores Falcón como el concentrador tipo Knelson, fueron realizadas para establecer algunos criterios selectivos de optimización del proceso.

Estas pruebas se realizaron con 0,8 kg a 70 % -200m, formando una pulpa de 25 % de sólidos (dilución de 3:1), en un equipo Falcón de 150 G de fuerza centrífuga y 5 psi de presión durante 5 minutos y un concentrador tipo Knelson con un caudal de alimentación de 30, 35, 40 y 45 L/min durante 60 minutos de operación.

**c. Caracterización física y granulometría**

- **Caracterización física**

Con la caracterización física, se obtuvo las condiciones propias del mineral, consiste en determinar la densidad aparente, humedad natural.

- **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. Para esto se utilizó 500 g de muestra y una malla de corte de abertura determinada.

- **Gravedad Especifica**

Determinación de la gravedad específica del mineral mediante el método de la fiola: peso específico =  $2,85 \text{ gr/cm}^3$

- **% Humedad natural**

El procedimiento para la determinación del % de humedad se realizó con el uso de una balanza analítica, primeramente se pesó la bandeja seguidamente se pesó 250 g de muestras homogenizada, luego se colocó la bandeja con la muestra en el horno y se mantuvo a una temperatura de 383,15 K durante 45 minutos, después del tiempo transcurrido, se retiró la bandeja y se esperó a que alcance la temperatura ambiente, finalmente se pesó las muestras para la determinación del % de humedad propia del material.

**d. Criterio de concentración**

El criterio de concentración utilizado en la separación gravimétrica es el siguiente:

$$\frac{D_h - D_f}{D_l - D_f} \quad [3]$$

Dónde:

- $D_h$  = densidad relativa del mineral pesado.
- $D_l$  = densidad relativa del mineral liviano.
- $D_f$  = densidad relativa del medio fluido.

En términos generales, el cociente obtenido es mayor que 1,25, la separación gravimétrica es relativamente fácil, sería posible comercialmente.

**e. Pruebas experimentales**

• **Prueba n° 1: mineral de oro**

Se realizaron las pruebas experimentales de concentración gravimétrica de mineral de oro proveniente de la zona del denuncia minero Manuela de Ite.

- **Preparación mecánica de la muestra**

Se realiza las pruebas del mineral aurífero, previas etapas de: chancado, molienda. Hasta llevarlo a un tamaño de partícula de 70 – 72 % -200 mallas. Se separó una muestra de 2,097 kilogramos a partir de 39,5 kilogramos, mediante el método de cono y cuarteo

**f. Pruebas de concentración - gravimétrica concentrador falcón**

- Flujo de la pulpa (L/min): 8
- Flujo del agua (L/min): 8
- Porcentaje de sólidos (%): 20
- Peso de mineral (g): 2097



Figura 24. Concentrador centrífugo falcón  
Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 4.1 Resultados

##### 4.1.1 Resultados de la caracterización física

A continuación, se muestra los resultados del % de humedad y el peso específico del mineral, para obtener un dato correcto se repitió dos veces las pruebas del % de humedad y peso específico y se obtuvo un promedio.

*Tabla 7.*

*Resultados de la caracterización física de relave*

Nº de ensayos	% de humedad	Peso específico
Ensayo 1	2,3	2,6
Ensayo 2	2,2	2,8
Promedio	2,25	2,7

Fuente: Propia del autor

##### 4.1.2 Resultados del análisis granulométrico

Así mismo se determinó los siguientes valores de la molienda con respecto al tiempo.

Tabla 8.

Resultados del análisis granulométrico del mineral (tamaño de partícula en % -200 mallas)

	Tiempo 15 min	Tiempo 25 min	Tiempo 30 min	Tiempo 35 min
Malla 200	45	60	70	71

Fuente: Elaboración propia.

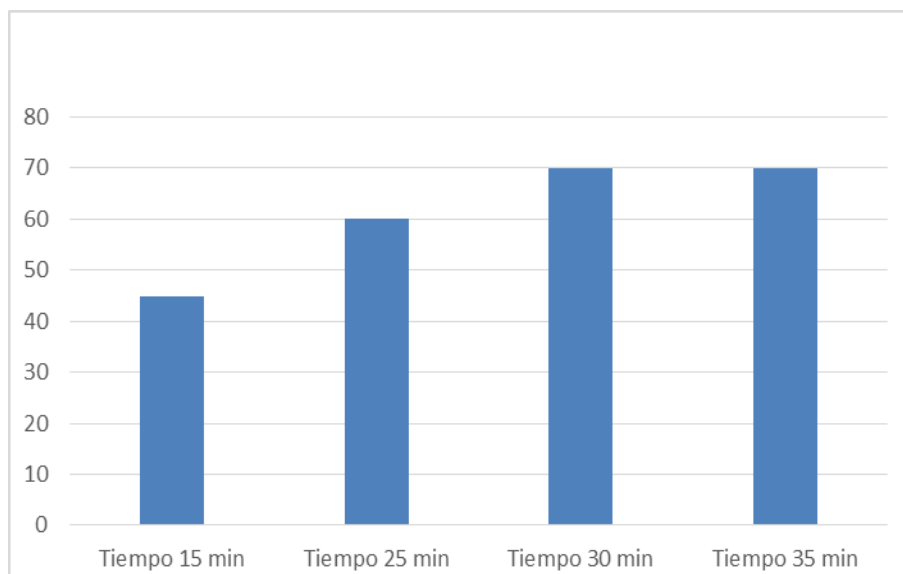


Figura 25. Curva de distribución granulométrico del relave directo de mina  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 25 se muestra la distribución granulométrica realizado al mineral, se obtuvo las condiciones adecuadas de molienda considerada la mejor condición el tamaño de partícula 70 – 71 % -200 mallas.

#### 4.1.3 Resultados de la concentración en el concentrador falcón

Luego de haber realizado las pruebas necesarias para la determinación del grado molienda 70 – 71 % -200 mallas, se ejecutaron las pruebas concentración gravimétrica, se muestran en las siguientes tablas de los resultados obtenidos.

Tabla 9.

Recuperación en el concentrador de falcón a 6 L/min

Producto	Peso g	Peso (%)	Ensayo Au g/t	Contenido metálico (g)	Distribución Au %
Alimentación	800	100,00	5,80	4640,00	100,00
Concentrado	30,42	3,80	80,60	2451,85	52,84
Relaves	769,58	96,20	160,03	2188,15	47,16
Total				4640,00	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.

Recuperación en el concentrador de falcón a 8 L/min

Producto	Peso g	Peso (%)	Ensayo Au g/t	Contenido metálico (g)	Distribución Au %
Alimentación	800	100,00	5,80	4640,00	100,00
Concentrado	20,87	2,61	57,18	1193,06	25,71
Relaves	779,14	97,39	160,03	3446,94	74,29
Total				4640,00	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.

Recuperación en el concentrador de falcón a 12 L/min

Producto	Peso G	Peso (%)	Ensayo Au g/t	Contenido metálico (g)	Distribución Au %
Alimentación	800	100,00	5,80	4640,00	100,00
Concentrado	21,26	2,66	50,33	1069,74	23,05
Relaves	778,75	97,34	160,03	3570,26	76,95
Total				4640,00	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12.

Recuperación en el concentrador de falcón a 20 L/min

Producto	Peso G	Peso (%)	Ensayo Au g/t	Contenido metálico (g)	Distribución Au %
Alimentación	800	100,00	5,80	4640,00	100,00
Concentrado	20,09	20,09	48,80	980,15	21,12
Relaves	779,92	97,49	160,03	3659,85	78,88
Total				4640,00	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13.

Balance metalúrgico en el concentrador falcón – peso 800 g y 5,80 g/t de Au.

Nº	Flujo de	Peso	Humedad	Peso	Ley	Alimentación	Contenido	Recuperación	Ratio
Pruebas	agua (L/min)	Conc. Kg.		Conc seco	Au g/t	Au g/t	metálico	Au (%)	concentration
1	6,0	31,20	2,50	30,42	80,60	5,80	2451,85	52,84	26,30
2	8,0	21,40	2,50	20,87	57,18	5,80	1193,06	25,71	38,34
3	12	21,80	2,50	21,26	50,33	5,80	1069,74	23,05	37,64
4	20	20,60	2,50	20,09	48,80	5,80	980,15	1,76	477,97

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla observamos que a mayor flujo de agua obtenemos menor recuperación, como muestra la prueba número 4. En la prueba número 1, a menor flujo de agua obtenemos mayor recuperación de oro.

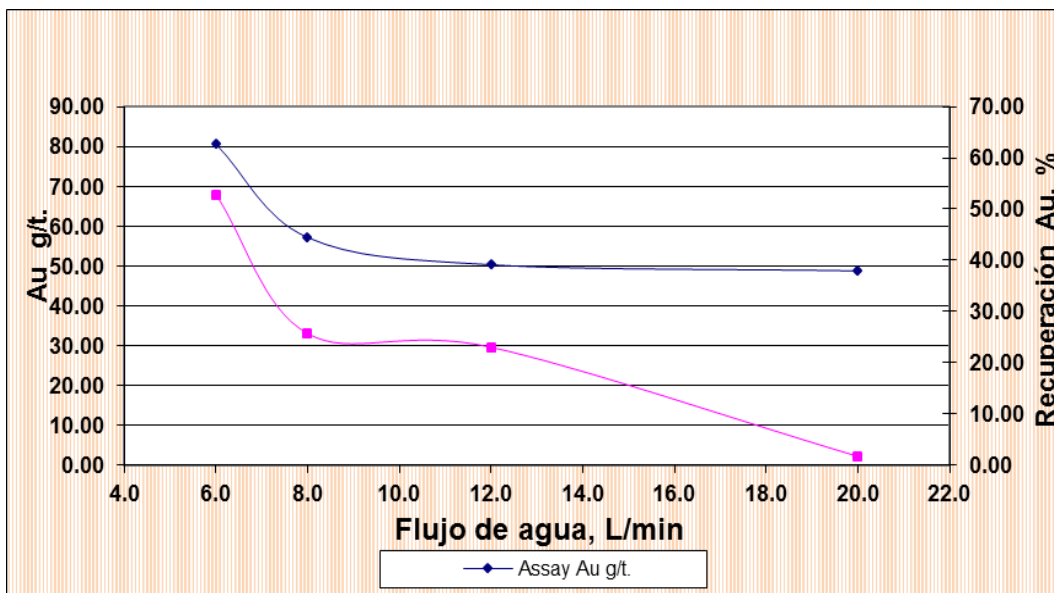


Figura 26. Comparación de leyes de Au y recuperaciones obtenidas en los concentrados para el concentrador gravimétrico falcón

Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama se observa que a menor flujo de agua y mayor ley del mineral, obtenemos mayor porcentaje de recuperación de oro.

#### 4.1.4 Resultados de la concentración en el concentrador piloto

Luego de haber realizado las pruebas necesarias de concentración centrífuga a nivel de laboratorio (70 – 71 % -200 mallas), se ejecutaron las pruebas concentración gravimétrica a nivel piloto, se muestran en las siguientes tablas de los resultados obtenidos.

Tabla 14.

Recuperación en el concentrador de piloto a 30 L/min

Producto	Peso T	Peso (%)	Ensayo Au g/t	Contenido metálico (g)	Distribución Au %
Alimentación	2	100,00	5,80	4640,00	100,00
Concentrado	0,074	3,69	69,10	5,10	43,94
Relaves	1,926	96,31	3,38	6,51	56,061
Total				11,61	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15.

Recuperación en el concentrador de piloto a 35 L/min

Producto	Peso T	Peso (%)	Ensayo Au g/t	Contenido metálico (g)	Distribución Au %
Alimentación	2	100,00	5,80	11,60	100,00
Concentrado	0,073	3,69	86,20	6,30	53,91
Relaves	1,927	96,34	2,80	5,40	46,086
Total				11,70	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16.

Recuperación en el concentrador de piloto a 40 L/min

Producto	Peso T	Peso (%)	Ensayo Au g/t	Contenido metálico (g)	Distribución Au %
Alimentación	2	100,00	5,80	11,60	100,00
Concentrado	0,06	3,30	69,60	4,49	39,84
Relaves	1,94	96,70	3,50	6,77	60,160
Total				11,26	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17.

Recuperación en el concentrador de piloto a 45 L/min

Producto	Peso T	Peso (%)	Ensayo Au g/t	Contenido metálico (g)	Distribución Au %
Alimentación	2	100,00	5,80	11,60	100,00
Concentrado	0,07	3,26	60,60	3,95	33,79
Relaves	1,93	96,74	4,0	7,73	66,21
Total				11,26	100,00

Fuente: Elaboración propia.

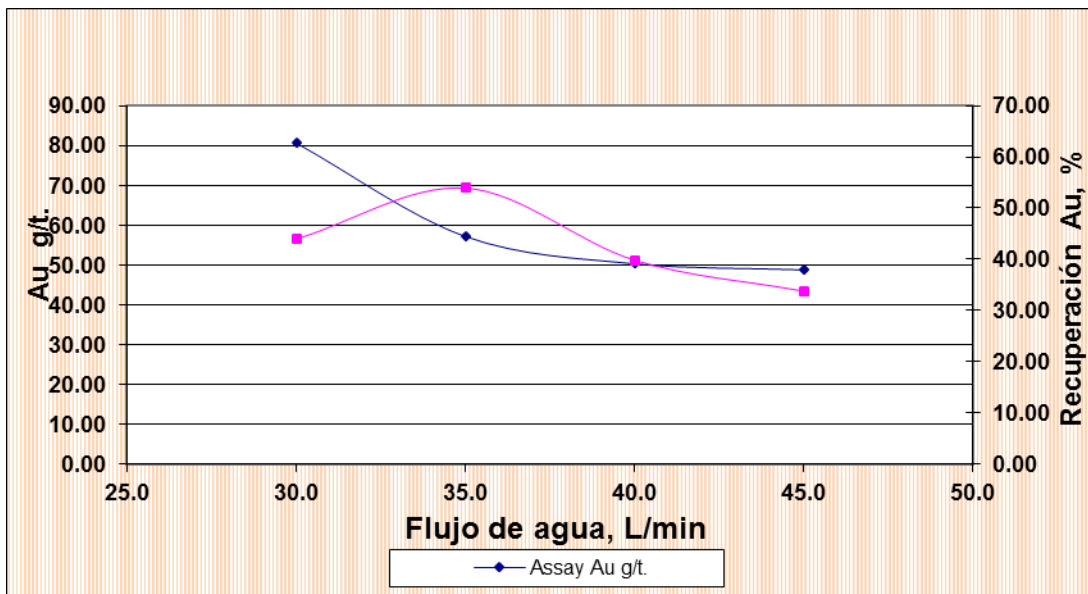


Figura 27. Comparación de leyes de Au y recuperaciones obtenidas en los concentrados para el concentrador gravimétrico piloto

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18.

*Balance metalúrgico en el concentrador piloto*

Nº	Flujo de	Peso	Humedad	Peso	Ley	Alimentación	Contenido	Recuperación	Ratio
Pruebas	agua (L/min)	Conc. Kg.		Conc seco	Au g/t	Au g/t	metálico	Au (%)	concentration
1	30	82,6	10,60	73,84	69,10	5,80	5,10	43,94	27,08
2	35	81,9	10,60	73,22	86,20	5,80	6,31	53,91	27,32
3	40	72,1	10,60	64,46	69,60	5,80	4,49	39,84	31,03
4	45	72,9	10,60	65,17	60,60	5,80	3,95	33,79	30,69

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Análisis

Los resultados del análisis granulométrico del mineral alimentado al concentrador falcón, son presentados en la tabla 6 y en la figura 24, donde el mineral alimentado al concentrador falcón es de tamaño de partícula 70 – 71 % -200 mallas. El tiempo necesario para alcanzar una granulometría óptima para el proceso de concentración centrífuga será aproximadamente 30 minutos.

Las pruebas que presenta en la tabla 11, se realizó en el concentrado gravimétrico falcón, se pesó 800 gr de mineral el cual se alimentó al concentrador, logrando obtener leyes hasta 80,6 gr Au/t y recuperaciones de 52,84 %, así mismo se puede apreciar el balance metalúrgico.

Las pruebas que presenta en la tabla 16, se realizó en el concentrado piloto se pesó 2 000 kg de mineral el cual se alimentó al concentrador, logrando obtener leyes hasta 86,2 gr Au/t y recuperaciones 53,91 %, así mismo se puede apreciar el balance metalúrgico.

## CONCLUSIONES

Se concluye que se realizó la caracterización física del mineral se determinó el % de humedad y resultó 2,25 % mientras el peso específico fue de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, se conoció el análisis granulométrico del mineral después de cada tiempo de molienda hasta obtener un 70 o 71 % malla -200.

Utilizando este método de recuperación mediante el concentrador falcón SB evitamos el uso de reactivos como mercurio y otros que afectan al medio ambiente, y así también se reduce los gastos de consumo en reactivos.

Se varió diferentes flujos de agua en las pruebas con el concentrador falcón, con el propósito de conocer este parámetro y ver sus resultados, se realizaron pruebas piloto variando el flujo, mejorando así la recuperación en un 40 % con respecto a los obtenidos en la planta piloto por la minera.

Se determinó el porcentaje de recuperación en el concentrador Falcon y concentrador piloto de las cuales se obtuvieron recuperaciones de 52,84 %, Au y 53,91 % Au respectivamente. A diferencia de la minera informal que tienen recuperaciones de 30-35 %.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda este proceso de concentración es que no se emplea reactivos químicos, no hay problemas de contaminación ambiental. Se requiere agua en una proporción adecuadas se debe de reciclar para ahorrar en su empleo.

Para mejor la recuperación, se requiere hacer más pruebas. Variando otros parámetro de operación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armando Álvarez q. (2006) “*tecnología de la concentración centrífuga*”.
- Azanza, J., (1994) “*Ensayos con el concentrador Knelson. Informe PMSC, Loja*”: <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2-1-6.htm>
- Burt R. O., (1984) “*Gravity Concentration Technology*”, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- Bruno Emilio Chaucayanqui Quisa (2012). “*modelo de planta piloto para recuperación del oro de la pequeña minería y minimizar los impactos ambientales*”.
- Cano C. M., (1991), “*Aplicación de espirales en la concentración de minerales*”.
- Clifoord D., (1999) “*Concentración Gravimétrica*”, Mining Journal – Edición en español.
- 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*”.
- Hinojosa O., Salas A. (1998) “*Concentración centrífuga de menas estanníferas*”.

Instituto geológico minero y metalurgico (INGEMET), (2017),” Estimación del potencial mineo metálico del Perú y su contribución económica al estado, acumulado al 2050”.

Martin Ángel Parillo Colque (2014) “estudio metalúrgico de minerales de oro del sector limbani – región Puno”.

McAlister S., (1998) “Development of the Falcon Concentrator, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration”.

McAlister Steven A., (1989)“Fine Gold Recovery using Falcon Concentrator”, Northwest Mining Association, 95th Annual Convention, Short course and Trade Show.

Nagy, I, Mrkusic, P. y Mcculloch, H.W. (1966)“Chemical Treatment of Refractory Gold Ores”. National Institute for Metallurgy, Ran Burg – South África.

Salas A., Hinojosa O. (2000) “Concentración centrífuga, alternativa al tratamiento de finos de casiterita”.

Saúl Lucio Llambi Pineda, (2013) “estudio de pre factibilidad para la instalación de una planta gravimétrica de concentración de oro aluvial en tingo maría”.

Taggart H.F., (1968) “*Elementos de preparación de minerales*”, Ediciones Interciencia.

Torres, J. (2011). *“Evaluación de los Métodos de Concentración Gravimétrica para la Recuperación de oro”*.

Villachica C. (2010) *“Proceso metalúrgico alternativo para la minería aurífera artesanal”*.

White, N. & Hendsquist, J. (1995). *Epithermal Gold Deposits: Styles, characteristics and exploration*. SEG Newsletter.