

UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Determinación de los parámetros operacionales para la
concentración de oro en un espiral”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autor:

JUAN JOSÉ REINOSO MÉNDEZ

Director:

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA, ECUADOR

2019

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado a mi familia, especialmente a mi madre y a mis abuelitos maternos que desde niño me apoyaron y me guiaron para poder cumplir mis sueños.

Especialmente le dedico a Dios por cuidarme y darme un día más de vida hasta el momento.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la dicha de prepararme y conseguir un Título Profesional.

A la Universidad del Azuay y a los ingenieros que apoyaron mi proyecto y en especial a mi Director de Tesis el Ingeniero Fernando Valencia que siempre estuvo pendiente y ayudándome en todo lo que necesitaba.

A los ingenieros Leonardo Núñez, Patricio Feijoo, Federico Auquilla, Leonardo Aníbal Núñez, Gil Álvarez y al Doctor Juan Calderón por guiarme y formarme en mi vida universitaria.

INDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|----------|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| INDICE DE CONTENIDOS | iv |
| INDICE DE FIGURAS..... | viii |
| INDICE DE ANEXOS..... | x |
| RESUMEN..... | xi |
| ABSTRACT..... | xii |
| | |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO | 3 |
| | |
| 1.1. Índices metalúrgicos..... | 3 |
| 1.1.1. Índices que Relacionan Calidad..... | 3 |
| 1.1.1.1. Recuperación (R)..... | 3 |
| 1.1.1.2. Razón de enriquecimiento (RE)..... | 4 |
| 1.1.2. Índices que Relacionan Capacidad..... | 4 |
| 1.1.2.1. Razón de concentración (RC)..... | 5 |
| 1.1.2.2. Rendimiento de Concentración (V) | 5 |
| 1.1.2.3. Eficiencia de la Separación (E)..... | 6 |
| 1.2. Concentración Gravimétrica | 6 |

| | | |
|------------|--|----|
| 1.2.1. | Principios de la concentración gravimétrica | 7 |
| 1.3. | Fundamentos | 9 |
| 1.3.1. | Centrifugación..... | 9 |
| 1.3.2. | Grado de liberación..... | 10 |
| 1.3.3. | Razón de Sedimentación | 10 |
| 1.3.4. | Criterios de concentración (C.C) | 10 |
| 1.4. | Métodos Gravimétricos..... | 13 |
| 1.4.1. | Métodos de concentración en medios densos | 13 |
| 1.4.2. | Métodos de concentración en corrientes..... | 14 |
| 1.5. | Equipos de concentración gravitacional..... | 15 |
| 1.5.1. | Mesa Vibratoria..... | 15 |
| 1.5.2. | JIG..... | 16 |
| 1.5.3. | Hidrociclón..... | 17 |
| 1.5.4. | Concentrador Espiral..... | 18 |
| 1.5.4.1. | El espiral y su principio de funcionamiento | 19 |
| 1.5.4.2. | Características de un espiral | 21 |
| 1.5.4.3. | Ventajas de los espirales | 22 |
| 1.5.4.4. | Desventajas de los espirales..... | 22 |
| 1.5.4.5. | Aplicaciones de la espiral | 23 |
| 1.5.4.6. | Clasificación de Espirales..... | 23 |
| 1.5.4.6.1. | Espirales de múltiples retiradas | 23 |
| 1.5.4.6.2. | Espirales de retiradas limitadas | 24 |
| 1.5.4.7. | Utilización de la espiral en la minería aurífera | 25 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 1.5.4.8. | Aspectos generales..... | 26 |
| 1.5.4.8.1. | Capacidad de tratamiento de sólidos | 26 |
| 1.5.4.8.2. | Consumo de agua | 26 |
| 1.5.4.8.3. | Porcentaje de sólidos | 27 |
| 1.5.4.8.4. | Granulometría de alimentación | 27 |
| 1.5.4.8.5. | Pesos específicos de los minerales a separar | 28 |
| 1.5.4.8.6. | Forma o tamaños de las partículas..... | 28 |
| 1.5.4.8.7. | Determinación del tamaño máximo del alimento..... | 28 |
| 1.6. | Placeres Aluviales | 29 |
| 1.6.1. | Aluvión..... | 29 |
| 1.6.2. | Placeres | 30 |
| 1.6.3. | Placeres Fluviales o Aluviales | 30 |
| CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL..... | | 32 |
| 2.1. | Descripción del Experimento..... | 32 |
| 2.2. | Descripción del material | 33 |
| 2.3. | Clasificación y separación por tamaños..... | 34 |
| 2.4. | Cuarteo de muestras | 35 |
| 2.5. | Granulometría | 37 |
| 2.6. | Análisis de laboratorio | 37 |
| 2.7. | Adecuación del espiral del laboratorio..... | 38 |
| 2.8. | Determinación de los factores y variables operaciones | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 2.8.1. Fracción de sólidos..... | 39 |
| 2.8.2. Caudal | 40 |
| 2.8.3. Sistema de ajuste del concentrado..... | 41 |
| 2.9. Determinación de problemas en el experimento..... | 42 |
| 2.10. Ajustes..... | 42 |
| | |
| CÁPITULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS | 44 |
| | |
| 3.1. Análisis de resultados..... | 44 |
| 3.1.1. Criterio de concentración. | 45 |
| 3.1.2. Recuperación..... | 45 |
| | |
| CONCLUSIONES..... | 51 |
| RECOMENDACIONES..... | 53 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 54 |
| ANEXOS | 56 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Aplicabilidad de la concentración gravimétrica según su criterio de concentración | 12 |
| Figura 1.2: Características de los métodos de separación por corrientes..... | 14 |
| Figura 1.3: Mesa Vibratoria | 16 |
| Figura 1.4: JIG | 17 |
| Figura 1.5: Hidrociclón | 18 |
| Figura 1.6: Espiral..... | 19 |
| Figura 1.7: Sección transversal de un espiral mostrando la posición de las bandas densa, intermedia y ligera..... | 21 |
| Figura 1.8: Espiral de múltiples retiradas | 24 |
| Figura 1.9: Espirales de retiradas limitadas | 25 |
| Figura 1.10: Radio de concentración vs Recuperación..... | 27 |
| Figura 1.11: Influencia del tamaño de alimentación en la selección del método de separación gravimétrica | 29 |
| | |
| Figura 2.1: Secado de material aluvial..... | 33 |
| Figura 2.2: Material Seco..... | 34 |
| Figura 2.3: Esquema de clasificación y separación de la muestra en el proceso | 35 |
| Figura 2.4: Cuarteo de muestras. | 36 |
| Figura 2.5: Cuarteo de muestra con especificaciones. | 36 |
| Figura 2.6: Tamizaje de muestras. | 37 |
| Figura 2.7: Estado actual del espiral. | 39 |
| Figura 2.8: Tamaños de abertura de la canaleta del espiral. | 41 |
| Figura 2.9: Diferenciación de los tamaños presentes en la canaleta del espiral en la prueba realizada. | 42 |
| | |
| Figura 3.1: Visualización de recuperaciones del equipo espiral..... | 48 |
| Figura 3.2: Visualización de recuperaciones mediante dispersión de puntos. | 49 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1: Criterio de concentración de algunos minerales comunes, concentrados mediante separación gravimétrica, de una ganga de densidad de 2.65 gr/cm..... | 12 |
| Tabla 2.1: Fracción de sólidos que se utilizan para la realización de los experimentos | 40 |
| Tabla 2.2: Tabla de caudales utilizados | 40 |
| Tabla 3.1: Resultado de concentración y cálculo de la ley del concentrado..... | 44 |
| Tabla 3.2: Resultado Criterio de concentración..... | 45 |
| Tabla 3.3: Cálculos de recuperación | 46 |
| Tabla 3.4: Fracción de sólidos, caudales y recuperaciones de los ensayos que han sido experimentados | 47 |

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Reporte de resultado de análisis químicos..... 56

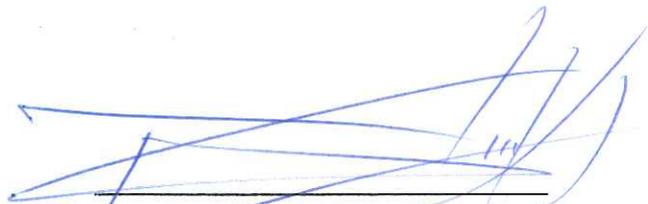
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES PARA LA CONCENTRACIÓN DE ORO EN UN ESPIRAL

RESUMEN

El concentrador espiral presenta ventajas frente a otros equipos de concentración gravimétrica como: el jig y la mesa vibratoria que operan bajo el mismo principio de recuperación, las mismas que están determinadas por distintas variables que pueden ser controladas para obtener mejores resultados, optimizando costos y tiempo.

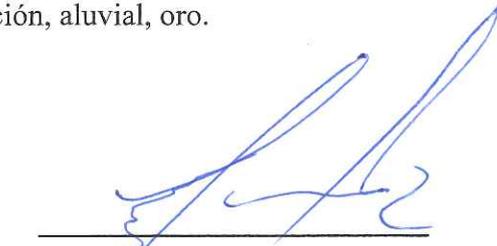
El presente trabajo de titulación plantea como objetivo principal determinar los parámetros bajo los cuales este equipo pueda obtener la mayor recuperación posible mediante la variación de los parámetros como: la fracción de sólidos y la variación del caudal de alimentación de pulpa con el afán de obtener la recuperación máxima, los resultados muestran que cuando la fracción de sólidos es de 20% con un caudal de 75.31 l/min, la recuperación es de 0.71 (71%).

Palabras clave: espiral, gravimétrico, concentración, aluvial, oro.



Ing. Fernando Valencia Guaricela

Director del trabajo de titulación



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de escuela



Juan José Reinoso Méndez

Autor

**DETERMINATION OF OPERATIONAL PARAMETERS FOR THE
CONCENTRATION OF GOLD IN A SPIRAL**

ABSTRACT

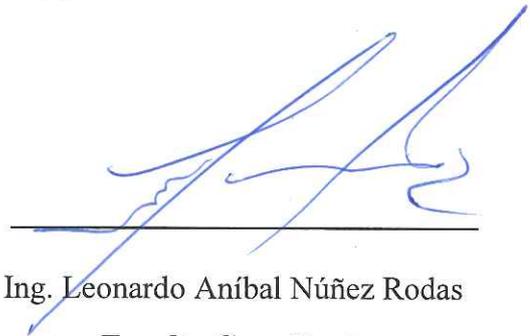
The spiral concentrator has advantages over other gravimetric concentration equipment such as the jig and the vibrating table that operate under the same principle of recovery. These are determined by different variables that can be controlled to obtain better results, to optimize costs and time. The main objective of the present degree work was to determine the parameters for this equipment to obtain the greatest possible recovery by varying the parameters such as the fraction of solids and the variation of the pulp feed flow to obtain the maximum recovery. The results show that when the solids fraction is 20% with a flow rate of 75.31 l/min, the recovery is 0.71 (71%).

Keywords: spiral, gravimetric, concentration, alluvial, gold.



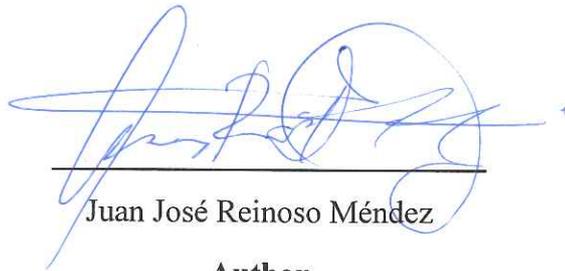
Ing. Fernando Valencia Guaricela

Thesis Director



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Faculty Coordinator



Juan José Reinoso Méndez

Author



Translated by
Ing. Paúl Arpi

Juan José Reinoso Méndez

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Valencia, M.Sc.

Mayo 2019

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES PARA CONCENTRACIÓN DE ORO EN UN ESPIRAL

INTRODUCCIÓN

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. (Valderrama, 2012).

La actividad minera en nuestro país ha sido de gran importancia debido a que se ha convertido en un proceso productivo que no solo ha contribuido con el desempeño económico, sino que a su vez ha impulsado a grandes empresas extranjeras para hacer conocer al Ecuador como un país rico en minerales generando plazas de trabajo en todos los sectores donde se desarrolla esta actividad.

En la industria minera los procesos de recuperación mineral poseen factores económicos y de tiempo que generan un problema a la hora de elegir un equipo de concentración óptimo que nos genere la máxima ganancia con el menor uso de energía.

Para la recuperación de minerales por medios físicos existen varias máquinas que cumplen con el objetivo de concentración gravimétrica como jigs, mesas vibratorias,

canaletas y espirales. Para el desarrollo de este proyecto se escogió el espiral que posee la Escuela de Ingeniería en Minas, con el objetivo de determinar los valores de los parámetros y variables operacionales con los que este equipo funciona correctamente. Se escogerán las variables que intervienen en el proceso de concentración de la espiral, por lo tanto, se podrá facilitar y estandarizar el uso de la misma.

Según Mesa, (2013). El uso del Espiral se remonta hasta el antiguo Egipto en donde usaban torres de espirales para poder separar los minerales pesados principalmente el Oro. Particularmente en la minería aurífera puede ser utilizado en diferentes tipos de yacimientos como los primarios (vetas) o secundarios (aluviales). La experiencia con los Espirales ha demostrado que es un método eficiente para recuperar oro laminar y granular además de que es un método fácil de aplicar puesto que solo se requiere el espiral y una corriente de agua para poder realizar la separación.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Índices metalúrgicos

Los índices metalúrgicos son números adimensionales que determinan la eficacia de la separación en varias etapas de concentración, además proporcionan información para el dimensionamiento de equipos de concentración. (Bustamante, 2018).

Los índices metalúrgicos se clasifican en; índices que relacionan calidad de la concentración e índices que relacionan capacidad del circuito de concentración.

1.1.1. Índices que Relacionan Calidad

Estos son los que proporcionan información acerca de la calidad de los productos obtenidos, bien sea en la etapa de concentración o globalmente en la planta. (Bustamante, 2018).

1.1.1.1. Recuperación (R)

Se define la recuperación como la relación que existe en una operación de concentración entre el peso del material útil o de interés que hay en el concentrado con respecto a la cantidad de ese mismo mineral que hay en la alimentación, o que ingresó a la operación. (Bustamante, 2018).

$$R = \frac{C \cdot t_c}{A \cdot t_a}$$

Dónde:

R = Recuperación

C = Peso del concentrado

t_c = Tenor del concentrado

A = Peso alimento

t_a = Tenor del alimento

1.1.1.2. Razón de enriquecimiento (RE)

Se define este índice como la relación que existe entre el tenor (o porcentaje) de mineral útil en el concentrado respecto al tenor (o porcentaje) del mismo mineral en la alimentación, entonces: (Bustamante, 2018).

$$R_E = \frac{T_c}{t_a}$$

Dónde:

R_E = Razón de enriquecimiento

t_c = Tenor del concentrado

t_a = Tenor del alimento

1.1.2. Índices que Relacionan Capacidad

Estos índices son la información necesaria para escalamiento, dimensionamiento y selección de equipos de concentración.

1.1.2.1. Razón de concentración (RC)

Se define como la razón entre el flujo másico de sólidos en la alimentación A con respecto al flujo de sólidos en el concentrado C

$$RC = \frac{A}{C}$$

Dónde:

RC= Razón de concentración

A= Peso alimento

C= Peso del concentrado

1.1.2.2. Rendimiento de Concentración (V)

Se define como la relación entre flujo másico en el concentrado respecto al flujo másico de sólidos en la alimentación, es el inverso de la razón de concentración y proporciona igual información. (Bustamante, 2018).

$$V = \frac{C}{A} = \frac{1}{RC}$$

Dónde:

RC= Razón de concentración

A= Peso alimento

C= Peso del concentrado

1.1.2.3. Eficiencia de la Separación (E)

Es un índice que combina la información obtenida en los anteriores numerales, el cual se define como:

$$E = \frac{R - V}{1 - V_{IDEAL}}$$

Dónde:

E = Eficiencia de la separación

R = Recuperación

V = Rendimiento de concentración

V_{IDEAL} = Tenor de alimento

1.2. Concentración Gravimétrica

Gravimetría es la operación por el cual podemos separar minerales pesados de otros menos pesados o livianos, aprovechando la diferencia de sus gravedades específicas, con adición de agua, teniendo en cuenta la presión y el flujo de ésta. (Carrasco, 2018)

Otro concepto es proceso de separación sólido-sólido empleando la fuerza centrífuga generada por un rotor girando a alta velocidad creando campos de gravedad de hasta 200 g (Gravedades), por lo que solo se emplea agua y la operación centrífuga como medio para realizar la separación, ampliando la diferencia relativa de peso específico que existe entre el mineral objetivo (oro) y la ganga, en este proceso no se emplea químicos solo agua a presión y generalmente se obtiene recuperaciones entre 20 a 80% por lo que son parte de un proceso posterior de flotación y/o cianuración. (Carrasco, 2018).

El proceso es llevado a cabo con base a movimientos verticales y horizontales en los cuales separa el material más pesado, por medio de la suspensión de partículas en un fluido y la separación por la diferencia de sus pesos específicos existentes, por esta razón que este proceso es excelente para la minería de tipo aluvial. (Carrasco, 2018).

Es necesario recalcar que en un proceso de tipo gravimétrico se obtendrán como resultado dos productos: el concentrado que contendrá el mineral de interés y las colas.

1.2.1. Principios de la concentración gravimétrica

El método de separación gravimétrica separa minerales de diferentes densidades respondiendo a un movimiento, a la gravedad y a otras fuerzas como la viscosidad de un fluido que es lo que ejerce la última resistencia al movimiento. La sedimentación libre de las partículas en un fluido de volumen grande con respecto al volumen total de las partículas, la acumulación de las partículas es despreciable. Para un buen dispersado de pulpas de mineral, la sedimentación libre predomina cuando el porcentaje de sólidos en peso es inferior a 15 %. (Carvajal & Chávez, 2015).

Considere una partícula esférica de diámetro d y la densidad D_s caer por gravedad en un fluido viscoso de densidad D_f bajo las condiciones libres de sedimentación. (Carvajal & Chávez, 2015).

Sobre la partícula actúan tres fuerzas: una fuerza gravitacional actuando hacia abajo, una fuerza de flotación ascendente debido al desplazamiento del fluido, y una fuerza de arrastre D actuando hacia arriba. La ecuación de movimiento de la partícula es: (Carvajal & Chávez, 2015).

$$mg - m'g - D = m \frac{dx}{dt}$$

Ecuación 1.1: Ecuación del movimiento de la partícula.

Dónde: m es la masa de la partícula, m' es la masa del fluido desplazado, x es la velocidad de la partícula y g es la aceleración de la gravedad.

Cuando se alcanza la velocidad terminal $m \frac{dx}{dt} = 0$ entonces:

$$D = (m - m')g$$

Por lo tanto:

$$D = \frac{\pi}{6} g d^3 (D_s - D_f)$$

Ecuación 1.2: Volumen de una esfera.

George Gabriel Stokes dice que la fuerza de arrastre sobre una partícula esférica se debe a la resistencia viscosa y dedujo la expresión:

$$D = 3\pi d n v$$

Dónde n es la viscosidad del fluido y v es la velocidad terminal entonces:

Sustituyendo ecuación 3 en ecuación 2

$$3\pi d n v = \frac{\pi}{6} g d^3 (D_s - D_f)$$

Ley de Stokes:

$$v = \frac{g d^2 (D_s - D_f)}{18 n}$$

Ecuación 3: Ley de Stokes

(Carvajal & Chávez, 2015).

1.3. Fundamentos

Los métodos de concentración por gravimetría llevan a cabo un efecto de suspensión ya sea total o parcial de las partículas del material; y la separación sólidos – líquidos se efectúa por el movimiento de dichas partículas y por el medio en el que estas se encuentran, que por lo general es agua. Algunos fundamentos son claves en este proceso ya que deben cumplir ciertas condiciones para que la operación sea óptima. (Avila, 2017).

1.3.1. Centrifugación

Todos los fenómenos y fuerzas que interaccionan en la concentración gravimétrica también actúan en la concentración centrífuga, algunos fenómenos son de mayor importancia que otros. Cuando se desea sedimentar partículas finas, es necesario aumentar la fuerza requerida para vencer la resistencia del fluido, fuerza que es conocida como fuerza centrífuga que obedece a la ecuación: (Avila, 2017).

$$F_C = (m - m') \omega^2 R - F_R = m \frac{\sigma v_t}{\rho t}$$

Donde:

F_C = Fuerza Centrífuga

m = Masa de la partícula

m' = Masa del fluido desalojado

ω^2 = Velocidad Angular

R = Radio de giro de la partícula

F_R = Fuerza de Resistencia del fluido

v_t = Velocidad tangencial

1.3.2. Grado de liberación

Según Michaud, (2016). La liberación se expresa como la cantidad de mineral de interés que puede quedar libre de material estéril cuando se realice una determinada reducción de tamaño.

Esta liberación está en función tanto de la probabilidad de ruptura como del tamaño al que se fracciona.

Cuando un mineral se fractura existen en el producto mineral liberado, ganga liberada y productos e intermedios, en los cuales está asociado mineral con ganga. (Michaud, 2016).

1.3.3. Razón de Sedimentación

Es la razón del diámetro de la partícula ligera respecto al diámetro de la partícula pesada que se está sedimentando igualmente con ella en condiciones específicas de balanceo hidráulico. Las razones aumentan a medida que las velocidades de sedimentación se convierten en movimientos turbulentos, dejando de ser movimientos viscosos. (Avila, 2017).

1.3.4. Criterios de concentración (C.C)

El criterio a tomar en cuenta para la determinación de cuál y que clase de separación es posible en un caso particular, es la gravedad específica y se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$C. C = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f}$$

Dónde:

ρ_h = Densidad relativa o gravedad específica del mineral pesado en Kg/m^3 .

ρ_l = Densidad relativa o gravedad específica del mineral liviano en Kg/m^3 .

ρ_f = Densidad relativa o gravedad específica del medio o fluido en Kg/m^3 .

Según Taggart, (1945). Si esta razón es mayor a 2.5 ya sea positivo o negativo, la separación gravimétrica será relativamente fácil para el material por debajo de los $75 \mu\text{m}$ (tamaños hasta 200 mallas). A medida que esta razón disminuye, la eficiencia de la separación también disminuye; En valores de 1.75 la concentración será posible para material por debajo de los $150 \mu\text{m}$ (entre 65 a 100 mallas). En valores de 1.5 la concentración suele ser muy difícil y valores iguales a 1.25 se consideran la razón límite inferior para la separación húmeda por gravimetría. (Avila, 2017).

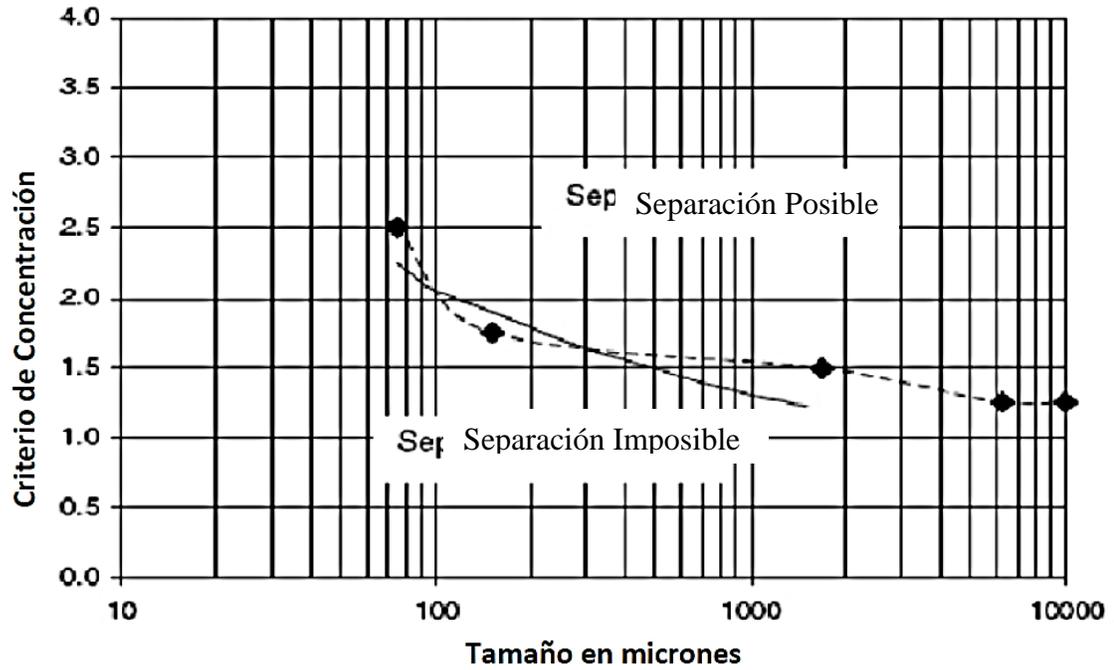


Figura 1. 1: Aplicabilidad de la concentración gravimétrica según su criterio de concentración
 Fuente: (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

Tabla 1. 1: Criterio de concentración de algunos minerales comunes, concentrados mediante separación gravimétrica, de una ganga de densidad de 2.65 gr/cm.

| Mineral | Fluido | C.C |
|------------|--------|------|
| Oro | Agua | 10.3 |
| Oro | Aire | 6.8 |
| Casiterita | Agua | 3.5 |
| Carbón | Agua | 3.4 |
| Hematita | Agua | 2.5 |

Fuente: (Avila, 2017)

1.4.Métodos Gravimétricos

Los métodos de concentración gravimétrica se clasifican en dos tipos:

1.4.1. Métodos de concentración en medios densos

Métodos de concentración en medios densos, cuando la densidad del medio es intermedio a las densidades de las especies que se quieren separar. Los métodos de concentración en medios densos pueden ser estáticos o dinámicos. La separación en medio denso consiste en separar sólidos en función de sus densidades usándose como medio un fluido de densidad intermedia, donde el sólido de densidad más baja flota y el de densidad más alta se va al fondo (se hunde). Los medios densos usados son: líquidos orgánicos, solución de sales en agua y más comúnmente suspensiones de sólidos de granulometría fina en agua. (Sánchez, 2011).

La separación en medio denso se divide en dos métodos básicos: en sistema estático y dinámico.

En el sistema estático se emplean aparatos concentradores con recipientes de varias formas, donde la separación se realiza en un medio relativamente tranquilo bajo la influencia de simples fuerzas gravitacionales, en este sistema la única fuerza actuante es la fuerza de gravedad. La separación en los sistemas estáticos se realiza en estanques, tambores, conos y vasos. Prácticamente, en la separación estática se trabaja en un rango granulométrico de 150 mm (6") a 5 mm (1/4"), pudiéndose tratar tamaños de hasta 35,6 cm (14"). (Sánchez, 2011).

1.4.2. Métodos de concentración en corrientes

En este método la densidad del medio es inferior a aquellas que de las especies se requieren separar. Existen varios tipos de separación en corrientes: corrientes verticales, corrientes longitudinales, corrientes oscilatorias y corrientes centrifugas. Cabe recalcar que la concentración en corrientes verticales confiere características propias a los defectos en el proceso porque es la separación más importante, y también utiliza al JIG como equipo principal de concentración. (Sánchez, 2011).

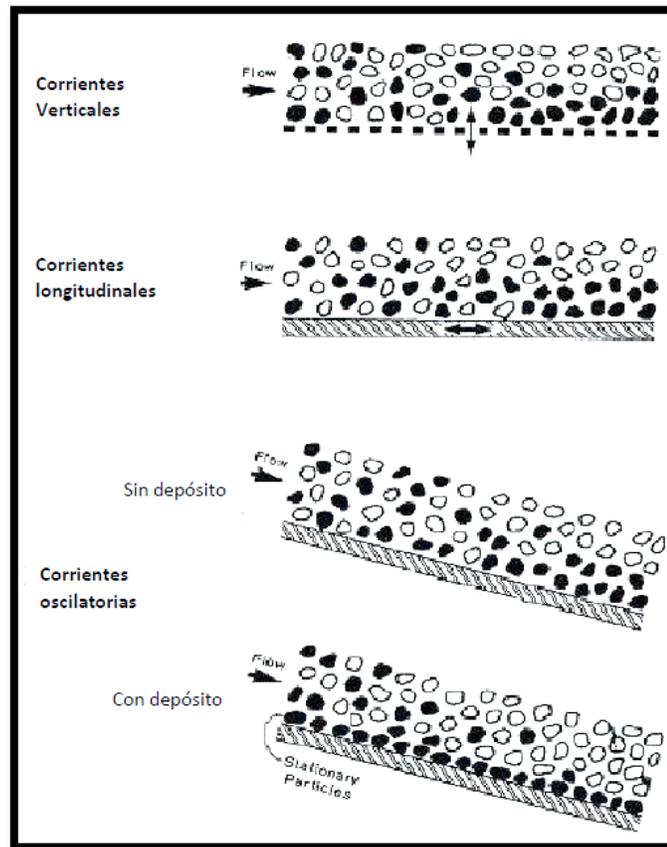


Figura 1. 2: Características de los métodos de separación por corrientes.

Fuente: (Sánchez, 2011)

1.5. Equipos de concentración gravitacional

1.5.1. Mesa Vibratoria

La mesa vibratoria se utiliza desde hace varias décadas. Es considerada de modo general el equipo más eficiente para el tratamiento de materiales con granulometría fina. Es un equipamiento muy utilizado en la limpieza de concentrado primario o secundario de menas de oro libre y menas aluviales. (Rivera , 2017).

Las mesas vibratorias son equipamientos de concentración que actúan a través de superficies con movimientos acelerados asimétricos, combinados muchas veces con el principio de escurrimiento laminar. (Rivera , 2017).

En 1985 fue lanzada la mesa de Wilfley que vino a constituirse en el principal modelo de mesa vibratoria. Efectivamente, solamente después de la constatación de su eficiencia el uso de la mesa fue propagado y surgieron nuevos modelos. (Pavez, 2005).

La mesa de Wilfley tuvo como principal modificación el cubrimiento parcial del tablero con “riffles” (canales) paralelos al eje longitudinal que permitió el tratamiento de la alimentación gruesa y aumentó su capacidad. Los “riffles” fueron introducidos con las siguientes finalidades: formar cavidades donde ocurra la formación de lecho y estratificación, ocultar las partículas pesadas para la transmisión de las vibraciones y exponer las partículas grandes y livianas al flujo transversal de agua de lavado después de la estratificación. (Pavez, 2005).



Figura 1. 3: Mesa Vibratoria

Fuente: Juan Reinoso

1.5.2. JIG

Es un equipo de concentración gravimétrica muy utilizado en la minería de minerales pesados y de alta densidad. Este equipo 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 del líquido producida por diferentes medios. Se usa para separar minerales pesados en los circuitos de molienda cerrados, para evitar la sobre molienda.

En la minería aurífera los componentes pesados están constituidos por el oro y diferentes sulfuros, en tanto que los livianos son cuarzo y diferentes tipos de roca. (Rodríguez, 2010).

El “jigging” es un resultado de la estratificación de material particulado bajo la influencia de fuerzas hidrodinámicas y la gravedad. Varios parámetros afectan el proceso de estratificación, las cuales incluyen la amplitud y frecuencia de pulsado, el espesor del lecho, la tasa de agua y las características del alimento. (Rodríguez, 2010).



Figura 1. 4: JIG
Fuente: Juan Reinoso

1.5.3. Hidrociclón

Son diseñados para separar soluciones minerales (Pulpas) en mezclas bifásicas de diferente granulometría, donde la pulpa entra tangencialmente en la parte superior del recipiente cilíndrico, y baja rotando por el ciclón generando una fuerza centrífuga que envía sólidos hacia las paredes del hidrociclón, estos luego descienden y son recogidos en la parte inferior (Cono). En el centro se produce una baja de presión que envía la parte más fluida (Sólidos más livianos) hacia arriba. (Acherman, 2014).



Figura 1. 5: Hidrociclón
Fuente: Juan Reinoso

1.5.4. Concentrador Espiral

El procedimiento de la concentración por espirales es muy antiguo, sabiendo que en el presente son utilizados para fines industriales muy importantes, los minerales que han sido concentrados por los mismos son muchos como por ejemplo el oro.

El primer tipo de espiral Humphrey se introdujo en el año 1945, su principio básico se ha mantenido hasta la actualidad, pero con progresos muy importantes en cuanto a sus grandes resultados en la concentración, su diseño y técnicas de fabricación. Los materiales para su construcción han evolucionado desde la madera y hierro fundido hasta el poliéster reforzado en fibra de vidrio. (Carvajal & Chávez, 2015).

Actualmente es construido en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con recubrimientos de poliuretano o goma. Los mayores avances del diseño han

incidido en el perfil y paso de la espiral. El campo de aplicación se ha expandido, debido al desarrollo de espirales en las cuales el paso y el perfil cambian a lo largo de su longitud. (Carvajal & Chávez, 2015).

En cuanto a los tipos de los espirales se dividen en dos tipos: espirales múltiples retiradas y espirales de retiradas limitadas. En la actualidad la tecnología se inclina a la construcción de espirales con menos puntos de retiradas del concentrado, con un único punto en el fondo de la hélice. Asimismo, el agua de lavado es reducida e incluso en varios casos siendo eliminada. (Carvajal & Chávez, 2015).



Figura 1. 6: Espiral
Fuente: Juan Reinoso

1.5.4.1. El espiral y su principio de funcionamiento

La espiral consiste de una canaleta helicoidal con cuatro a siete vueltas que posee una sección transversal semicircular modificada y ajustada bajo su diseño correspondiente. En la parte superior del equipo existe una caja donde recibe la

alimentación en forma de pulpa. A medida que la pulpa fluye, las partículas que tienen mayor peso se encuentran en una faja a lo largo del lado interno del flujo de la pulpa, las mismas son removidas por las aberturas que se encuentran en la parte más baja de la sección transversal. (Carvajal & Chávez, 2015).

Las partículas más pesadas se reúnen en el fondo, donde la fricción y el lastre actúan para aminorar la velocidad del material. Debido a la forma del espiral del lecho de la canaleta, las fuerzas centrifugas en la pulpa llevan al material más liviano hacia afuera, hacia el borde de la espiral, mientras que el material pesado permanece adentro.

Existen dos aberturas para cada vuelta de la espiral. Estas aberturas están provistas de un dispositivo que permite guiar los minerales pesados para obtener la separación deseada, a través de una regulación conveniente. Cada abertura es conectada a un tubo colector central, a través de mangueras de tal forma que se juntan los materiales recogidos en las diferentes aberturas en un único producto. En el extremo inferior del canal existe una caja destinada a recoger los minerales livianos que no son recogidos por las aberturas. (Carvajal & Chávez, 2015).

La espiral funciona como una combinación de escurrimiento laminar y acción centrifuga. Cuando los minerales se encuentran en la espiral comienzan a depositarse de acuerdo a sus tamaños, forma y densidades correspondientes. Las partículas que poseen mayor peso específico se depositan casi de manera inmediata. Una vez que se encuentra en contacto con la superficie del canal o cercana a ella, las partículas son encarceladas por una fina película de fluido que se adhiere a la superficie de la misma, es necesario recalcar que esta película se mueve con velocidades menores que el resto de la corriente que contiene los minerales más livianos y pequeños que no lograron depositarse. Como efecto principal, la pulpa se divide en dos partes: la película fluida conteniendo los

minerales predominantemente gruesos y pesados y el resto de la corriente, conteniendo los minerales pequeños y livianos y casi toda el agua introducida con la pulpa. La película fluida prácticamente no tendrá su trayectoria influenciada por la acción centrífuga y se moverá lentamente para el interior del canal donde será removida por las aberturas. (Carvajal & Chávez, 2015)

La concentración en espirales ocurre rápidamente. Una vez introducida la pulpa, posteriormente en las dos primeras vueltas se puede retirar un concentrado puro. El material recogido por las aberturas de las últimas vueltas puede ser retirado separadamente, pasando en este caso a constituir un producto medio. (Carvajal & Chávez, 2015).

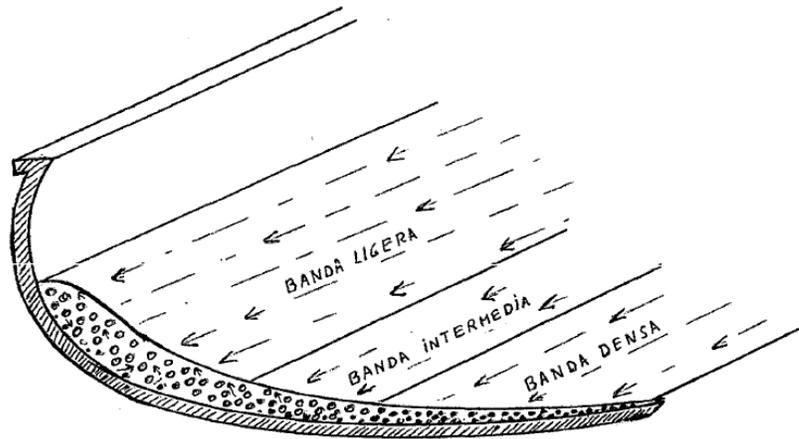


Figura 1. 7: Sección transversal de un espiral mostrando la posición de las bandas densa, intermedia y ligera.

Fuente: (Taggart, 1945)

1.5.4.2. Características de un espiral

- La concentración en espirales puede realizarse por etapas, en general una etapa de desbaste es seguida de etapas de limpieza. En el caso de menas metálicas,

normalmente se retira un relave final en la etapa de desbaste, mientras que, un pre-concentrado pasa a la etapa de limpieza. (Auris Huayta, et al., 2013).

- La espiral posee un canal con forma helicoidal cilíndrico con sección transversal semicircular modificada. y en la parte superior tiene una caja donde recibe la alimentación en forma de pulpa. Cuando esta se escurre, las partículas más pesadas se encuentran en una faja a lo largo del lado interno del flujo de la pulpa, estas son removidas por las aberturas que existen en la parte baja de su sección transversal. (Auris Huayta, et al., 2013).

En las espirales Humphrey existen dos aberturas para cada vuelta de la espiral. Estas aberturas están provistas de un dispositivo que permite guiar los minerales pesados para obtener la separación deseada, a través de una regulación conveniente. Cada abertura es conectada a un tubo colector central, a través de mangueras de tal forma que se juntan los materiales recogidos en las diferentes aberturas en un único producto. En el extremo inferior del canal existe una caja destinada a recoger los minerales livianos que no son recogidos por las aberturas. (Auris Huayta, et al., 2013).

1.5.4.3. Ventajas de los espirales

- Fáciles de operar
- No requiere un gran mantenimiento
- No requieren de gran impulsión motriz
- Posee una producción continua en cuanto al pre-concentrado
- Extracción de productos intermedios como los sulfuros

1.5.4.4. Desventajas de los espirales

- Necesita de material de alimentación menor a 2 mm

- Bajo grado de enriquecimiento es por esta razón que tiene un mayor uso en la etapa de pre-concentración

1.5.4.5. Aplicaciones de la espiral

- Tratamiento de menas de hierro
- Tratamiento de arenas de playa
- Tratamiento de minerales como: cromita, tantalita y oro
- Tratamiento de carbón

1.5.4.6. Clasificación de Espirales

Las espirales se dividen en dos tipos: espirales de múltiples retiradas y espirales de retiradas limitadas.

1.5.4.6.1. Espirales de múltiples retiradas

La espiral original Humphrey presenta cinco vueltas completas de hélice, la cual es un conducto helicoidal conectado a una columna central que sirve también para la descarga del concentrado. Se fabrican en segmentos de 120° (3 segmentos forman una vuelta). Se construyen en hierro fundido (con o sin revestimiento de goma) y en fibra de vidrio (con revestimiento de goma). Se entregan en hélices simples o dobles, en ese caso se acoplan en 180° en torno a la columna central. (Auris Huayta, et al., 2013).



Figura 1. 8: Espiral de múltiples retiradas
Fuente: (Auris Huayta, et al., 2013)

1.5.4.6.2. Espirales de retiradas limitadas

La tecnología se inclina a la construcción de espirales con menos puntos de retiradas del concentrado, varias con un único punto, en el fondo de la hélice. También el agua de lavado ha sido reducida e incluso en algunos casos ha sido eliminada.

Estas espirales han sido fabricadas por la Reichert, Vickers, Xatal, Spargo, etc. En la Unión Soviética han sido proyectadas espirales de hasta 2 metros de diámetro. (Auris Huayta, et al., 2013)



Figura 1. 9: Espirales de retiradas limitadas
Fuente: (Auris Huayta, et al., 2013)

1.5.4.7. Utilización de la espiral en la minería aurífera

La espiral se utiliza principalmente para la preconcentración de materiales auríferos, tanto primarios como secundarios. También se utiliza para recuperar el oro y las piritas auríferas que todavía existen en las colas del proceso ("scavenger"). Pudiendo recuperar máximamente los valores de desecho, evitando contaminación con el medio ambiente con piritas. También se obtiene colas que no poseen partículas finas, que pueden retenerse en pozos de sedimentación, en caso de escasez de agua puede recircular la misma. El uso de

este tipo de equipos en pequeña minería aluvial es restringido por la dificultad de clasificar un volumen muy extenso de carga menor a 2mm. (Auris Huayta, et al., 2013).

1.5.4.8.Aspectos generales

1.5.4.8.1. Capacidad de tratamiento de sólidos

La capacidad en cuanto al tratamiento para los sólidos en el concentrador espiral varía de 0,5 a 2,5 t/h, siendo esta la tasa más utilizada es de 1,5 t/h. El flujo de pulpa de la alimentación depende de las características de las menas. Para materiales finos se aconseja flujos de 50 hasta 60 l/min, para materiales medios, 70 a 90 l/min y para materiales gruesos, en torno de 110 l/min. (Carvajal & Chávez, 2015).

1.5.4.8.2. Consumo de agua

El consumo de agua para cada concentrador espiral, incluyendo el agua de lavado varía de 50 a 110 l/min. Esta agua es normalmente recuperada y recirculada. Por esta razón debe señalarse que la nueva generación de espirales no necesita aporte de agua de lavado, debido a que funciona eficientemente sin el uso de esta agua, en el caso de las espirales de retiradas limitadas, el agua de lavado ha sido reducida e incluso en ciertos casos ha sido eliminada. (Carvajal & Chávez, 2015).

1.5.4.8.3. Porcentaje de sólidos

El porcentaje de sólidos es de 20 a 30%, pulpas conteniendo sólidos de granulometría gruesa, pueden tener hasta 50% de sólidos. Sin embargo, las espirales más trabajan con porcentajes de sólidos superiores a los que se utilizan convencionalmente, los cuales varían entre 30 a 50 %, el tamaño de las partículas puede intervenir a la concentración, tratando minerales que poseen pesos específicos muy cercanos logrando alcanzar una separación eficiente. (Carvajal & Chávez, 2015).

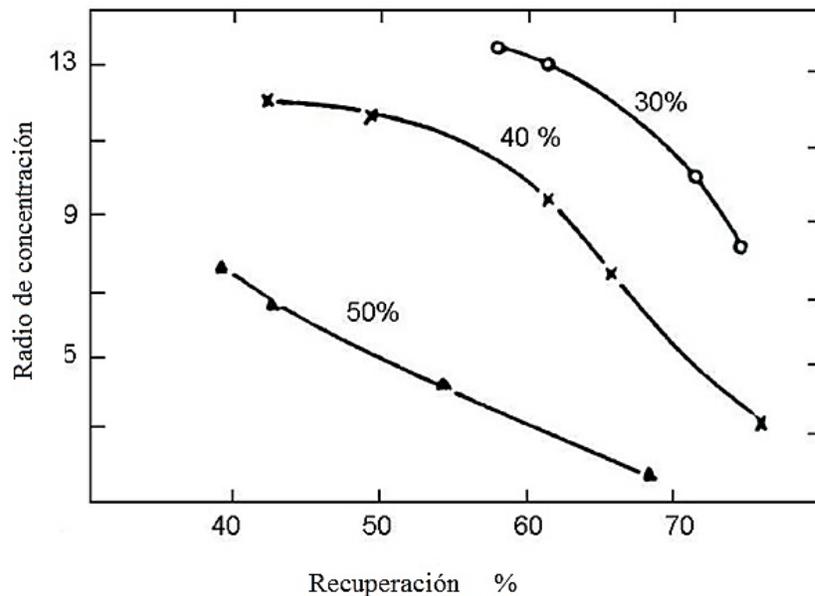


Figura 1. 10: Radio de concentración vs Recuperación

Fuente: (Auris Huayta, et al., 2013)

1.5.4.8.4. Granulometría de alimentación

Los límites granulométricos de los minerales pesados que se encuentran contenidos en una pulpa son de 8 mallas y pueden llegar hasta 200 mallas. Los minerales con peso específico bajo varían hasta 4 mallas sin afectar el

desempeño que realizan, mientras más grande y amplio es el rango de granulometría, tiende a ser menor la eficiencia del equipo. Si bien es cierto esta eficiencia disminuye cuando existen granulometrías inferiores a 200 mallas. (Carvajal & Chávez, 2015)

1.5.4.8.5. Pesos específicos de los minerales a separar

La desigualdad de pesos específicos entre el mineral útil y el mineral de desecho (colas), tienen que ser siempre mayores que 1,0 para obtener como resultado una concentración conveniente. La eficiencia de las espirales mejora con el aumento de los pesos específicos de los minerales pesados. (Carvajal & Chávez, 2015)

1.5.4.8.6. Forma o tamaños de las partículas

La forma o tamaños de las partículas muchas veces influyen en la concentración, por lo que, teniendo minerales con pesos específicos muy cercanos, puede obtenerse una adecuada concentración. (Carvajal & Chávez, 2015)

1.5.4.8.7. Determinación del tamaño máximo del alimento

Según Torres et al. (1994). para todas las formas de concentración usando la gravedad, es necesario triturar el material a un tamaño lo suficientemente fino para que las partículas sean en su mayor parte, una sola especie mineral y dependan únicamente de su peso específico al momento de la concentración.

Según varios autores afirman que el material de alimentación en el espiral es igual o menor a 2 mm, para lograr una óptima concentración.

Por otra parte, el tamaño de la alimentación depende de cada concentrador por lo que en el caso del espiral el tamaño se muestra en la figura 1.11.

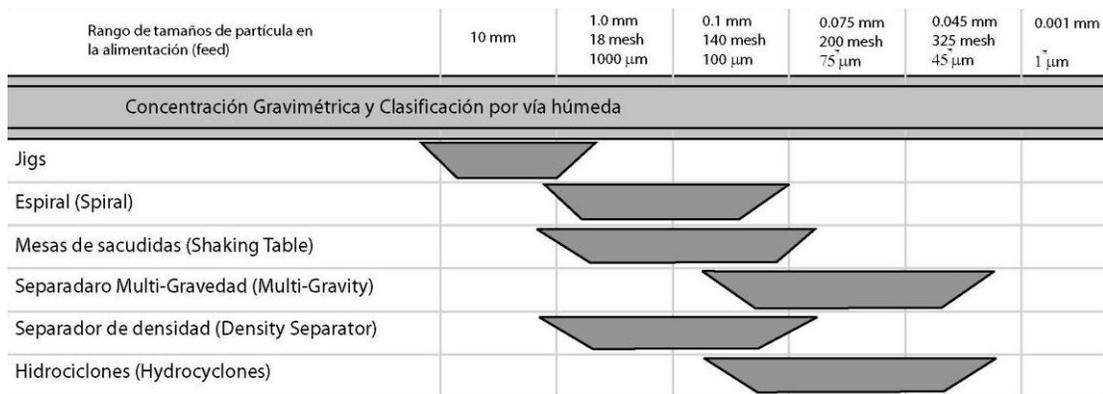


Figura 1. 11: Influencia del tamaño de alimentación en la selección del método de separación gravimétrica

Fuente: (Cartagena, 2011)

1.6. Placeres Aluviales

1.6.1. Aluvión

Depósito mineral compuesto de materiales sueltos o cementados como piedras, arenas, arcillas, etc., que ocupan el lecho antiguo o actual de los ríos o de los valles o de sus flancos y en ocasiones por fenómenos geológicos, las crestas o las mesetas de las montañas. Estos depósitos no necesariamente, tienen que tener minerales valiosos; si los tienen se llaman Placeres (Cavidad, 1998).

1.6.2. Placeres

Depósitos de arenas, gravas y otros materiales detríticos o residuales que contienen uno o varios minerales valiosos, que han sido acumulados a través del tiempo por concentración mecánica. Los minerales valiosos son generalmente, oro, platino, cobre, estaño (casiterita), mercurio, tungsteno, monazita, ilmenita, magnetita, rutilo, circón, granate, diamante, uranio, andalucita, rubí, zafiro, pirita, galena, etc., (Cavidad, 1998).

1.6.3. Placeres Fluviales o Aluviales

Los depósitos aluviales se encuentran normalmente en las cuencas de drenajes, en los valles de los ríos y el pie de monte de las cordilleras, en donde se forman abanicos aluviales de conformidad con los sedimentos arrastrados por los ríos de descarga en las planicies de inundación, ésta simple geometría es típica en la mayor parte de los depósitos de oro aluvial. (Sandoval, 2013).

El ambiente de este tipo de depósitos empieza en las áreas fuente, donde los sedimentos auríferos entran a las partes superiores de las corrientes, como mezclas heterogéneas de rocas, parcialmente alteradas. El oro más pesado y más grueso, se asienta más rápidamente que sus sedimentos y se puede ir hasta el fondo de la roca Basal o Peña. El oro fino y laminar será transportado lejos de su fuente. Esta distancia que recorre el oro fino, ha sido calculada por algunos geólogos en 40 km; este oro no puede recuperarse con los equipos tradicionales de concentración por gravedad. El estimado anterior da a entender que las concentraciones de oro, de diversos tamaños, que se encuentran a lo largo de un río o de un depósito aluvial, no provienen de una sola fuente, en las cabeceras de río, sino que han recibido aportes de varios afluentes secundarios en su recorrido. (Sandoval, 2013).

En este tipo de depósitos las concentraciones, en las partes altas o cabeceras de las corrientes, tienen muchas variaciones con el tiempo; es decir, hay épocas de erosión y de depositaciones continuas. Cualquier alteración del lecho, del río por crecientes fuertes o por la mano del hombre o por otro fenómeno, arrastra lo depositado en un tiempo y lo concentra en otra parte. Los depósitos aluviales reciben diversos nombres según el tipo de concentración que hagan. (Sandoval, 2013)

Entre estos mencionaremos la terrazas, las cuales son de varios tipos, las concentraciones en barras (rifles) naturales de lechos de ríos; las depresiones (huecos) de los lechos; las partes superiores de las islas las partes internas de las curvas o meandros, los remolinos, la confluencia de corrientes, las concentraciones que ocurren por pérdida súbita de velocidad y gradientes, tal como ocurren a la entrada y salida de un estrecho de la corriente; las concentraciones por pérdida de velocidad, debido a la carga de sedimentos en el lecho, o por la presencia de rocas y por último, las concentraciones que pueden ocurrir después de las crecientes, llamados depósitos de llanura de inundación (Cavidad, 1998)

CAPÍTULO II

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

2.1. Descripción del Experimento

Las pruebas que se ejecutaron, se realizaron en un concentrador espiral Humphrey. Para poder utilizar el espiral se efectuaron arreglos necesarios para el correcto funcionamiento, para recircular la pulpa y obtener el caudal necesario se realizaron ensayos previos con el afán de comprobar que la bomba no posea ningún inconveniente.

Luego se evaluaron las variables a utilizarse en este experimento: el caudal, la fracción de sólidos.

Se preparó las pulpas de tres maneras diferentes para analizar en qué circunstancias el concentrador opera de una forma óptima estas fueron desarrolladas por un diseño experimental llamado ANOVA (*Analysis Of Variance*) no balanceado, el mismo que puede usar medias ajustadas para predecir los resultados que habría producido un diseño balanceado. Este nos dio una matriz de 9 experimentos que se duplican para poder realizar una comparación para deducir cuales son las características necesarias de la pulpa para la concentración óptima en el equipo.

De las variables operacionales de la máquina se escogió la fracción de sólidos y el caudal de ingreso a la espiral los cuales van a ir cambiando, se decidió tomar tres caudales diferentes y tres fracciones de sólidos diferentes posteriormente se ha dejado que la máquina concentre durante 6 minutos, observando los resultados se tendrá en cuenta la diferencia que existe entre una y otra prueba.

Posteriormente las muestras fueron llevadas a análisis de laboratorio para la determinación de cantidad de oro que existe en cada uno de los experimentos realizados pudiendo comprobar la cantidad más alta de oro que existe con cada uno de ellos.

2.2.Descripción del material

El material que se ha seleccionado para realizar este trabajo corresponde un material aluvial con oro, mediante esta identificación del mineral se ha podido determinar varias de sus propiedades físicas tales como la densidad, la composición, la textura y el tamaño de partículas.

La densidad del material se calculó mediante pruebas de laboratorio con picnómetro y balanza analítica, según esto la densidad calculada nos da un valor de $2,4 \text{ t/m}^3$, que se aproxima a la densidad teórica de este material que varía entre $2,4$ y $2,8 \text{ t/m}^3$.



Figura 2. 1: Secado de material aluvial



Figura 2. 2: Material Seco

2.3. Clasificación y separación por tamaños

Para realizar la clasificación y separación por tamaños, primero pasa por un clasificador el mismo posee el laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay. Este considera dos números de mallas, por lo que es conveniente que pase un material menor a dos milímetros y el material de mayor tamaño se deseche, seleccionamos una gran parte del material para realizar el cuarteo y posteriormente se puedan realizar los experimentos.

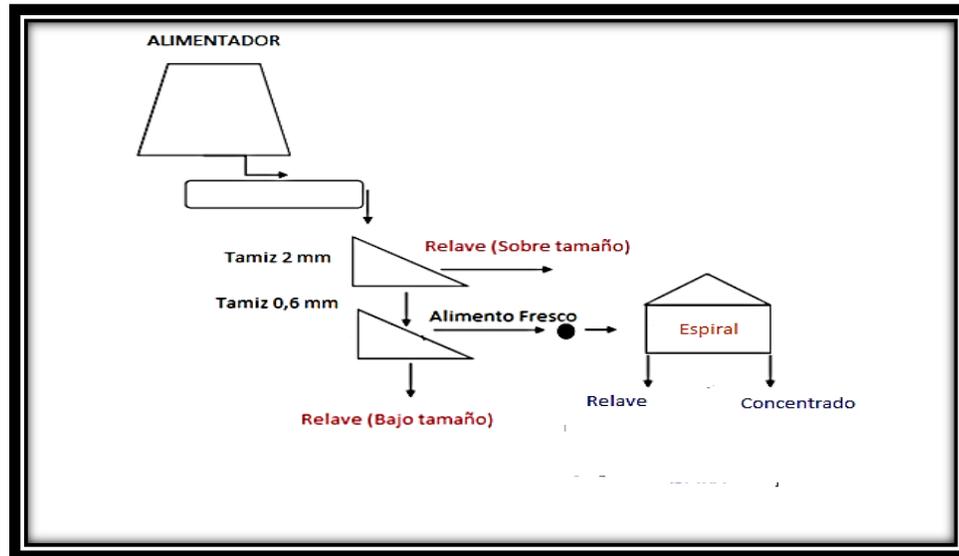


Figura 2. 3: Esquema de clasificación y separación de la muestra en el proceso

2.4. Cuarteo de muestras

Se realiza con la finalidad de alcanzar pequeñas muestras de mineral, las mismas que representan las propiedades físicas y químicas del mismo, obteniendo como resultado una muestra representativa de todo el material.

Según Barrientos, (2013). El procedimiento de cuarteo consiste en dividir el material en cuatro porciones logrando eliminar las dos esquinas opuestas y escoger las otras dos, realizando este mismo procedimiento las veces necesarias hasta tener la cantidad requerida de muestra.

Luego de haber realizado la clasificación granulométrica, se procedió a realizar la homogenización del material, la cual se efectuó por partes.

Una vez homogenizado el material, se separó la cantidad de material necesario para realizar los experimentos en el equipo.



Figura 2. 4: Cuarteo de muestras.



Figura 2. 5: Cuarteo de muestra con especificaciones.

2.5. Granulometría

Para realizar la prueba se analizaron los requerimientos técnicos de la espiral, en estos nos dice que el espiral admite materiales cuyos tamaños sean menores a dos milímetros.

Según este parámetro se procedió a realizar a tamizar la muestra, para llevar a cabo dos clasificaciones que consisten en pasar dos tamaños diferentes de tamiz, para realizar esta prueba seleccionamos los números de tamiz según la marca Humboldt que nos da el tamiz número 30 que tiene una abertura de 0.6 mm y el tamiz número 80 que tiene una abertura de 0.18 mm.



Figura 2. 6: Tamizaje de muestras

2.6. Análisis de laboratorio

Para realizar el análisis de la mineralogía del material se efectuaron dos procedimientos, el primero consiste en tomar la muestra ya procesada por el espiral y colocarla en un platón con agua realizando un movimiento ondular para separar los materiales finos que aún se encuentran tras pasar el material por el espiral con esto obtenemos entre 5 y 65 gr de muestra.

El segundo es un análisis químico realizado en el laboratorio de la Universidad del Azuay; en este se efectuó pesando 5 gr de muestra en una balanza analítica, estos cinco gramos se los coloca en unos vasos de digestión para microondas Mars 6 a esto se le agrega 10 ml de agua regia. Se ingresan los vasos en el microondas y se coloca la opción de digestión para rocas, que es el procedimiento que se usa para este tipo de material, el procedimiento se demora aproximadamente una hora en realizar la digestión y tres horas para que las muestras se puedan enfriar, posteriormente se coloca la solución que se ha formado en un balón de aforo de 100 ml, se afora este balón y se procede a realizar el análisis de absorción atómica realizando este análisis nos ha dado una concentración de oro 5 gr/t.

2.7. Adecuación del espiral del laboratorio

El concentrador espiral presentaba varios inconvenientes en su instalación, como la falta de mangueras para circular y recircular el agua, por lo que se ha procedido a realizar unas mejoras, para tener las condiciones técnicas que se encuentran en el manual del concentrador.

El espiral trabaja con caudales aproximados entre 60 y 75 l/s, para esto se acopló la bomba existente en el hidrociclón cuyo modelo es 1.5/1 AH WARMAN PUMP de pulpas con forros reemplazables para el bombeo continuo de abrasivos y corrosivos; esta se acciona mediante un motor trifásico de 5 hp su función consiste en conducir la pulpa hacia las cañerías del espiral.

Para la preparación de la pulpa se conectaron las cañerías al tanque del hidrociclón que está hecha de poliéster y tiene una capacidad de 0.35 m³ y se sostiene en una estructura de hierro; así mismo se realizaron cambios en válvulas y se rectificaron algunos inconvenientes que presentaba el equipo.



Figura 2. 7: Estado actual del espiral.
Fuente: Juan Reinoso

2.8. Determinación de los factores y variables operaciones

2.8.1. Fracción de sólidos

Las fracciones de sólidos que se han utilizado son: 10, 15 y 20 %. Con estos porcentajes se realizaron cálculos para determinar cuál sería la pulpa óptima para desarrollar los experimentos necesarios, con estos cálculos se presentó la necesidad de usar 32 l de agua para cada pulpa y dependiendo de las fórmulas utilizadas se ha variado la cantidad de material a mezclarse, las fórmulas que se han utilizado son las siguientes.

$$\phi = \frac{ws}{wt}$$

Dónde:

ws = Peso de la muestra

wt = Peso total ($ws+wl$)

wl = Peso del líquido

Tabla 2. 1: Fracción de sólidos que se utilizan para la realización de los experimentos

| Fracción de sólidos (%) | peso de la muestra (Kg) |
|-------------------------|-------------------------|
| 10% | 3.55 |
| 15% | 5.65 |
| 20% | 8 |

2.8.2. Caudal

El caudal que se ha usado se consideró mediante un recipiente de 9 litros para poder calcular el tiempo en segundos (s) que se demora en ser llenado, este cálculo nos da el caudal en (l/min); para realizar este análisis han usado tres caudales diferentes para poder determinar con cual la recuperación es mayor.

Tabla 2. 2: Tabla de caudales utilizados

| Caudal (l/min) | | |
|----------------|----|----|
| Q1 | Q2 | Q3 |
| 64 | 71 | 75 |

2.8.3. Sistema de ajuste del concentrado

Debido a experimentos realizados anteriormente se ha decidido posicionar la abertura de la canaleta de ajuste de espiral en 3.5 cm puesto que al haber realizado experimentos previos se ha determinado que con este tamaño de abertura de la canaleta del espiral la cual ayuda a diferenciar la calidad del material.

La canaleta posee tres aberturas diferentes, la abertura que se encuentra en la esquina superior corresponde al concentrado, la del medio corresponde a los materiales grueso y la que se encuentra en la esquina izquierda corresponde a los materiales finos; estos pueden ser modificadas dependiendo del material a usarse para el experimento, las aberturas son de 3.5, 8 y 2.5 cm respectivamente como se puede ver en la figura 2.8.



Figura 2. 8: Tamaños de abertura de la canaleta del espiral



Figura 2. 9: Diferenciación de los tamaños presentes en la canaleta del espiral en la prueba realizada

2.9.Determinación de problemas en el experimento

Al realizar experimentos previos se logró determinar que al momento de aumentar el porcentaje de la pulpa la bomba que se utiliza para hacer circular la misma comienza a tener problemas y se traba el flujo, evitando así que la pulpa llegue a la parte de la alimentación del espiral.

2.10. Ajustes

Puesto que el espiral se encontró varios años sin ser usado se debió realizar varios ajustes:

- Existió la necesidad del cambio de la manguera que se conecta a la alimentación puesto a que el caudal se reducía debido a que la manguera se encontraba estrangulada y no llegaba el caudal necesario para realizar la concentración.

- La canaleta se encontraba con medidas que no tenían fundamentación teórica, por lo que se procedió a realizar un cambio en las medidas de esta para que la concentración se la más alta posible, con este cambio se notó que los resultados mejoraron notablemente.
- El tiempo de concentración y procesamiento se tomó mediante un cronómetro dándonos un tiempo estimado de 6 minutos.

CÁPITULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Análisis de resultados

Al concluir el proceso de experimentación, se ejecutan los cálculos para evidenciar lo que se planteó en la teoría y para determinar si el equipo trabaja de una forma eficiente, en la tabla 3.1 se puede observar los resultados de las 18 muestras, luego se procedió a calcular la ley en (gr/m^3).

Tabla 3. 1: Resultado de concentración y cálculo de la ley del concentrado.

| Codificación | Concentración (gr/t) | Densidad (t/m ³) | Ley (gr/m ³) |
|--------------|----------------------|------------------------------|--------------------------|
| Q01 | 87.58 | 2.4 | 210.192 |
| Q02 | 43.29 | 2.4 | 103.896 |
| Q03 | 13.67 | 2.4 | 32.808 |
| Q04 | 0 | 2.4 | 0 |
| Q05 | 166.26 | 2.4 | 399.024 |
| Q06 | 3.85 | 2.4 | 9.24 |
| Q07 | 38.9 | 2.4 | 93.36 |
| Q08 | 63.9 | 2.4 | 153.36 |
| Q09 | 174.86 | 2.4 | 419.664 |
| Q10 | 151.28 | 2.4 | 363.072 |
| Q11 | 81.17 | 2.4 | 194.808 |
| Q12 | 79.85 | 2.4 | 191.64 |
| Q13 | 291.69 | 2.4 | 700.056 |
| Q14 | 0.2 | 2.4 | 0.48 |
| Q15 | 9.75 | 2.4 | 23.4 |
| Q16 | 7.13 | 2.4 | 17.112 |
| Q17 | 77.13 | 2.4 | 185.112 |
| Q18 | 567.76 | 2.4 | 1362.624 |

3.1.1. Criterio de concentración.

Como se especificó en el Capítulo 1, el criterio de concentración es el coeficiente que determina si la separación es posible en cualquier proceso gravimétrico. Por esto se debe calcular la densidad del mineral pesado y del mineral liviano. Los mismos que se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Resultado Criterio de concentración

| Criterio de concentración (C.C) | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| ρp (gr/m ³) | ρl (gr/m ³) | $\rho H2O$ (gr/m ³) | C.C (gr/m ³) |
| 19,32 | 2,4 | 1 | 13,09 |

El valor que resulta para el criterio de concentración es de 13,1 redondeándolo, lo que significa que es posible la separación gravimétrica para este material aluvial.

3.1.2. Recuperación

Como ya nombrado anteriormente la recuperación es la relación que existe en una operación de concentración entre el peso del material útil o de interés que hay en el concentrado con respecto a la cantidad de ese mismo mineral que hay en la alimentación. Para calcular la recuperación usamos la siguiente formula. (Bustamante, Notas de concentración de minerales, 2018)

$$R = \frac{C. t_c}{A. t_a}$$

Puesto que se han realizado 18 análisis cada uno con especificaciones diferentes, la recuperación varía en cada caso esto se puede observar en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3: Cálculos de recuperación

| Código | Concentrado (kg) | Tenor de concentrado (ppm) | Alimento (kg) | Tenor de alimento (ppm) | Recuperación | Recuperación (%) |
|--------|------------------|----------------------------|---------------|-------------------------|--------------|------------------|
| Q01 | 0.087 | 87.58 | 8 | 5 | 0.19 | 19.05 |
| Q02 | 0.029 | 43.29 | 3.55 | 5 | 0.07 | 7.07 |
| Q03 | 0.037 | 13.67 | 3.55 | 5 | 0.03 | 2.85 |
| Q04 | 0.059 | 0 | 3.55 | 5 | 0.00 | 0.00 |
| Q05 | 0.044 | 166.26 | 5.65 | 5 | 0.26 | 25.90 |
| Q06 | 0.06 | 3.85 | 5.65 | 5 | 0.01 | 0.82 |
| Q07 | 0.079 | 38.9 | 5.65 | 5 | 0.11 | 10.88 |
| Q08 | 0.052 | 63.9 | 5.65 | 5 | 0.12 | 11.76 |
| Q09 | 0.039 | 174.86 | 5.65 | 5 | 0.24 | 24.14 |
| Q10 | 0.041 | 151.28 | 8 | 5 | 0.16 | 15.51 |
| Q11 | 0.046 | 81.17 | 8 | 5 | 0.09 | 9.33 |
| Q12 | 0.064 | 79.85 | 8 | 5 | 0.13 | 12.78 |
| Q13 | 0.049 | 291.69 | 8 | 5 | 0.36 | 35.73 |
| Q14 | 0.06 | 0.2 | 3.55 | 5 | 0.00 | 0.07 |
| Q15 | 0.033 | 9.75 | 3.55 | 5 | 0.02 | 1.81 |
| Q16 | 0.07 | 7.13 | 3.55 | 5 | 0.03 | 2.81 |
| Q17 | 0.016 | 77.13 | 5.65 | 5 | 0.04 | 4.37 |
| Q18 | 0.05 | 567.76 | 8 | 5 | 0.71 | 70.97 |

Las variables que influyen directamente en el cálculo de la recuperación se pueden observar en la tabla 3.4.

Tabla 3. 4: Fracción de sólidos, caudales y recuperaciones de los ensayos que han sido experimentados

| Fracción de Sólidos | Caudal (l/min) | Recuperación |
|----------------------------|-----------------------|---------------------|
| 0.2 | 64.05 | 0.190 |
| 0.1 | 64.13 | 0.071 |
| 0.1 | 64.28 | 0.028 |
| 0.1 | 70.49 | 0.000 |
| 0.15 | 71.7 | 0.259 |
| 0.15 | 75.84 | 0.008 |
| 0.15 | 64.32 | 0.109 |
| 0.15 | 64.2 | 0.118 |
| 0.15 | 71.42 | 0.241 |
| 0.2 | 70.77 | 0.155 |
| 0.2 | 75.7 | 0.093 |
| 0.2 | 71.53 | 0.128 |
| 0.2 | 64.28 | 0.357 |
| 0.1 | 75.1 | 0.001 |
| 0.1 | 75.4 | 0.018 |
| 0.1 | 71.42 | 0.028 |
| 0.15 | 75.63 | 0.044 |
| 0.2 | 75.31 | 0.710 |

Se ha realizado una visualización mediante un diagrama para observar cual es el comportamiento de la recuperación con cada una de las variables que afectan al mismo, esto se puede observar en las figuras (3.1, 3.2).

En la Figura 3.1 se observa en qué condiciones se produce la mayor recuperación con el concentrador espiral, esta se encuentra de color rojo y se puede determinar que cuando se tiene un mayor caudal con una mayor fracción de sólidos la recuperación es mayor.

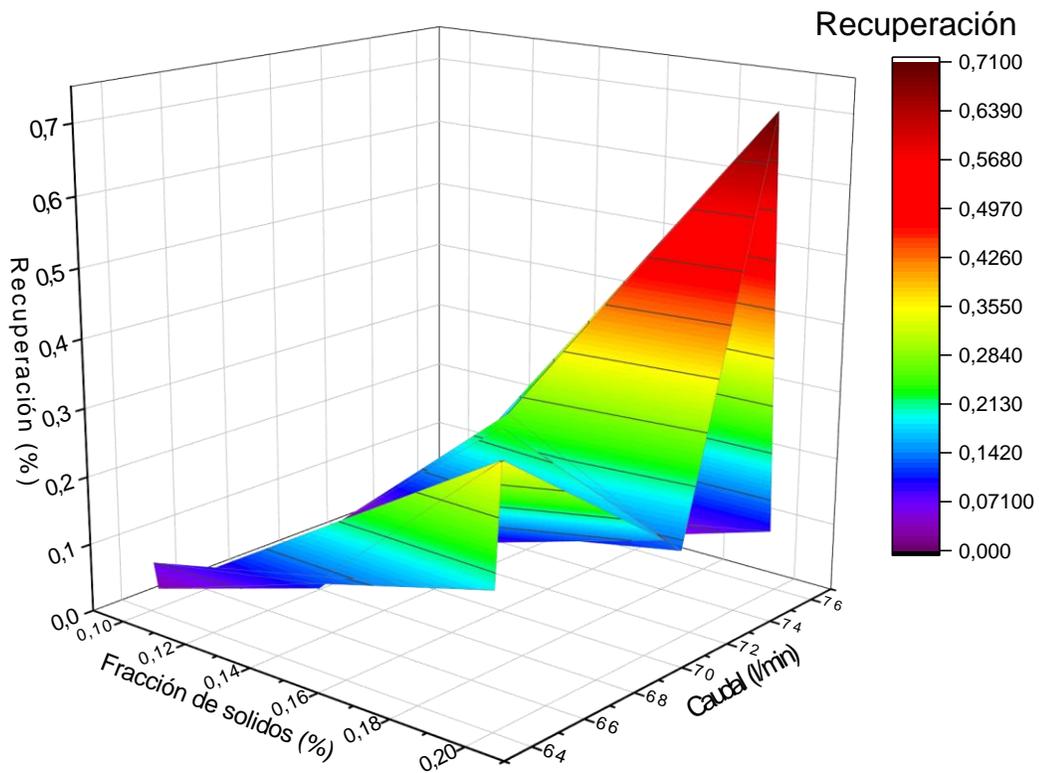


Figura 3. 1: Visualización de recuperaciones del equipo espiral

En la figura 3.2 contamos con diagrama de dispersión en el que se puede ver claramente cuáles son las condiciones necesarias para que esta pueda ser mayor.

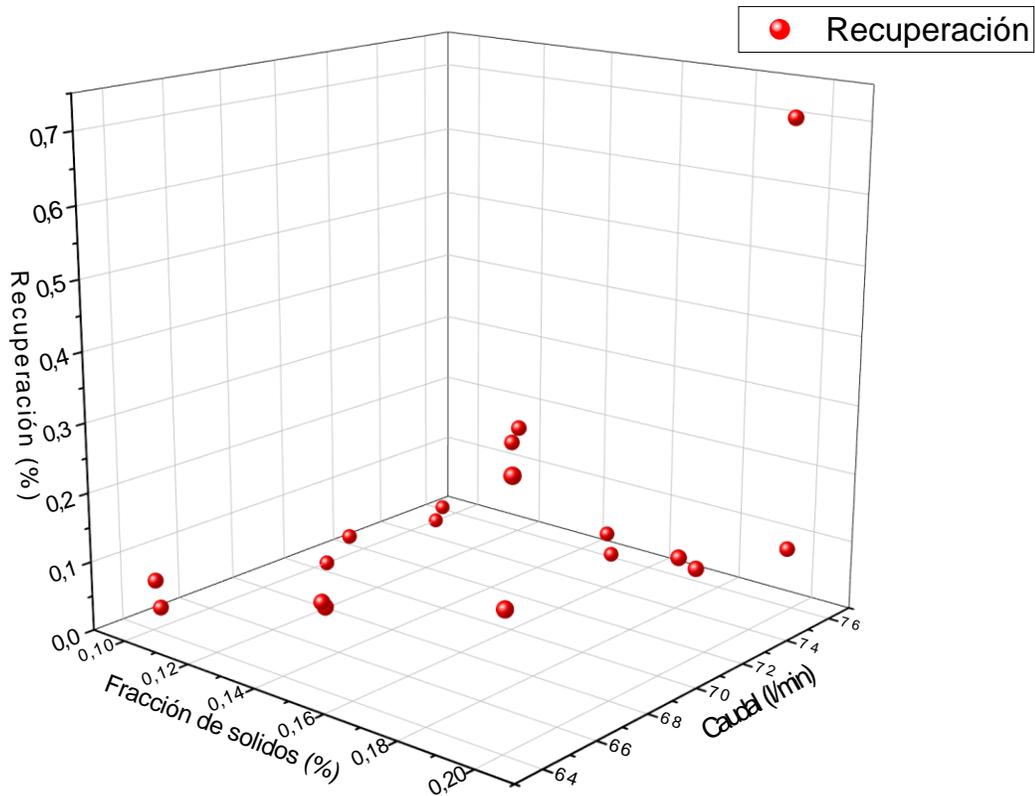


Figura 3. 2: Visualización de recuperaciones mediante dispersión de puntos.

Al observar los resultados podemos inferir cuales son las condiciones con las que el equipo debe trabajar para tener la concentración más elevada, según lo que se ha calculado debemos ajustar la bomba para tener un caudal constante de 75,31 l/min, una fracción de sólidos del 20% dándonos así un resultado de recuperación de 71% aunque se puede mejorar aún más mediante la mejora de las destrezas que posee el

operador, además se realizó el trabajo en un tiempo de 6 min lo que se le puede aumentar o disminuir para poder tener una recuperación más alta.

CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos concluimos que:

- En las variables analizadas, que corresponden al ensayo número 18 de la fracción de sólidos de la muestra y al caudal manejado, se observa que para alcanzar la mayor recuperación se necesita 0.2 (20%) y 75.31 l/min respectivamente ya que con estas variables se determinó una recuperación de 0.71 (71%).
- Los otros ensayos que se han realizado en este estudio han demostrado que las recuperaciones dan como resultado valores relativamente bajos, siendo la prueba número 13 la más próxima a la recuperación de 0.35 (35%) durante el proceso.
- Los espirales se caracterizan por tener buenos índices de recuperación, de igual manera por su bajo factor de enriquecimiento, por este motivo los espirales son utilizados en la fase de preconcentración o para la recuperación de minerales residuales.
- Según Luis Valderrama, de la Universidad de Atacama, indica que el uso de la espiral, para recuperación de minerales aluviales, presenta una ventaja frente a otros concentradores gravimétricos, debido a que genera una recuperación de partículas tanto por su peso específico como por su granulometría, lo cual confirma que en el estudio realizado existió una elevada recuperación del

mineral mediante la utilización del concentrador espiral que se encuentra en el laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay

- Existieron varios problemas operativos que tuvieron que ser afinados previamente entre estos determinamos el sistema de bombeo, puesto que por la capacidad de la bomba existía atascamientos al momento de introducir pulpas con mayor fracción de sólidos.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar otras pruebas con valores diferentes de fracción de sólidos y aumentar el caudal utilizado en este estudio con el afán de determinar los valores óptimos de estas dos variables para tener la recuperación máxima en el espiral.
- Se recomienda utilizar una bomba nueva que posea mayor capacidad de flujo y potencia para evitar atascamientos del material pudiendo realizar nuevos ensayos, puesto que por la alta densidad de la pulpa se trababa el paso del material y la bomba tenía inconvenientes al momento de realizar su trabajo, esto es debido a que la bomba presente en el laboratorio de la Universidad del Azuay no permite utilizar una fracción de sólidos y un caudal mayor.
- Se recomienda mantener el flujo de la alimentación constante para no tener inconvenientes en el proceso de concentración, además de eso se sugiere evitar estrangulaciones en la manguera y así poder controlar un paso constante en el flujo del caudal. Por esta razón se sugiere instalar un sistema de alimentación el cual permita el paso del material a tratarse de forma más regulada.
- Con la ejecución ensayos previos se pudo determinar que la fracción de sólidos no puede exceder el 0,2 (20%) de la pulpa, debido a que la potencia y capacidad de la bomba no permite el paso de pulpas de alta densidad, es por esta razón se recomienda que el material utilizado no debe exceder la fracción de sólidos para evitar obstrucciones en la máquina.

BIBLIOGRAFÍA

- Acherman, S. R. (2014). El hidrociclón como una partícula para la recuperación parcial de ayudas filtrantes en los procesos de refinación.
- Auris Huayta, N., Jorge Mesa, G., Londoña Zavala, L., Nuñez Mucha, B., Ore Ríos, C., Rondon Poma, M., Vargas Huanuco, W. (4 de Noviembre de 2013). Concentración de minerales en espirales Humpreys. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del centro del Perú.
- Avila, J. D. (2017). Parámetros de operación del separador JIG para material tomado de un placer aurífero. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Bueno, H. (2013). Concentración de minerales en espirales HUMPREYS. Lima.
- Bustamante, O. (2018). Notas de concentración de minerales.
- Bustamante, O., Gaviria, A. C., & Restrepo, O. J. (2008). Concentración de minerales. Medellín.
- Carrasco, C. (2018). Influencia de la presión de agua y la fuerza de gravedad centrífuga en la recuperación de oro mediante concentración gravimétrica centrífuga para un mineral tipo antracita . Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
- Cartagena, U. P. (2011). *OCW UPCT*. Obtenido de http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5555/mod_resource/content/1/Tema_8_-_Concentración_por_Gravedad_I_-_Pulsadoras.pdf
- Carvajal , C. D., & Chávez, A. E. (2015). Estudio del concentrador gravimétrico helicoidal hecho con fibra de vidrio y sus parámetros de funcionamiento . Arequipa.
- Cavidad, R. (1998). Manual de exploración y evaluación de aluviones. Medellín.
- Chavez, K. (2016). Concentración de minerales en espirales Humpreys.

- Mesa, J. (2013). Concentración de minerales en espirales Humpreys. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del centro del Perú.
- Michaud, D. (2016). Grado de liberación de partículas.
- Morgan, C. (2015). Métodos de concentración gravimétrica.
- Pavez, O. (2005). Concentración de minerales II. Atacama.
- Quisbert, T. (2014). Concentración en espirales.
- Quispe, A. (2015). La concentración centrífuga, una alternativa para recuperar oro fino a partir de residuos gravimétricos y su relación con la mitigación ambiental.
- Rivera, S. (2017). Concentración gravimétrica; densidades; mesa vibratoria; ángulo transversal; mineral útil; mena aluvial. Cuenca.
- Rodriguez, H. (2010). Estudio de la concentración gravimétrica de minerales.
- Sánchez, L. (2011). concentración en Jig. Lima.
- Sandoval. (2013). Caracterización geológica y geoquímica .
- Valderrama, L. (2012). Recuperación de oro grueso en concentrador centrífugo knelson.

ANEXOS

Anexo 1. Reporte de resultado de análisis químicos.

| | | | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------|--|
| ORDEN No.: 351 | FECHA 4/01/2019 | RECEPCIÓN: | FECHA DE ENTREGA: 11/01/2019 |
| CODIGO LAB: Q | CLIENTE: Juan José Reinoso | DIRECCIÓN: | García Moreno 5-50 |
| RUC/CEDULA: 0301992855 | MUESTRA: Suelos | CANTIDAD: | aproximadamente 50 gramos. |
| CONDICION DE LA MUESTRA: Ambiente | MUESTREADO POR: Cliente | ANALISIS SOLICITADO: | Oro |

IDENTIFICACION DE LA (S) MUESTRA(S):

| Identificación Cliente | Identificación UDALAB |
|-------------------------------|------------------------------|
| JJ-E1-3 | 351Q01 |
| JJ-N1-1 | 351Q02 |
| JJ-E1-1 | 351Q03 |
| JJ-N2-1 | 351Q04 |
| JJ-E2-2 | 351Q05 |
| JJ-N3-2 | 351Q06 |
| JJ-E1-2 | 351Q07 |
| JJ-N1-2 | 351Q08 |
| JJ-N2-2 | 351Q09 |
| JJ-N2-3 | 351Q10 |
| JJ-E3-3 | 351Q11 |
| JJ-E2-3 | 351Q12 |

| | |
|---------|--------|
| JJ-N1-3 | 351Q13 |
| JJ-N3-1 | 351Q14 |
| JJ-E3-1 | 351Q15 |
| JJ-E2-1 | 351Q16 |
| JJ-E3-2 | 351Q17 |
| JJ-N3-3 | 351Q18 |

RESULTADOS

Muestra: Q-01

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 87,58 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-02

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 43,29 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-03

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 13,67 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-04

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | <ld | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-05

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 166,26 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-06

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 3,85 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-07

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 38,90 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-08

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------------|-----------------|--|------------------|-----------------------------|------------------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 63,90 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-09

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------------|-----------------|--|------------------|-----------------------------|------------------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 174,86 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-10

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------------|-----------------|--|------------------|-----------------------------|------------------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 151,28 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-11

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------------|-----------------|--|------------------|-----------------------------|------------------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 81,17 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-12

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------------------|------------------|
|-----------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------------------|------------------|

| | | | | | |
|-----|-----|--|-------|------------|-----|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 79.85 | 0.23 mg/kg | N/A |
|-----|-----|--|-------|------------|-----|

Muestra: Q-13

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 291,69 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-14

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 0,2 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-15

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 9,75 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-16

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|----------|----------|--|-----------|----------------------|-----------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 7,13 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-17

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------------|-----------------|--|------------------|-----------------------------|------------------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 77,13 | 0.23 mg/kg | N/A |

Muestra: Q-18

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------------|-----------------|--|------------------|-----------------------------|------------------|
| ORO | g/T | Metals by flame atomic absorption spectrometry | 567,76 | 0.23 mg/kg | N/A |

OBSERVACIONES:

Abreviaturas:

N/A: No Aplica