



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Construcción de mesa concentradora para  
la concentración gravimétrica de oro  
microscópico de mineral proveniente del  
Estado de México.**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera de Minas y Metalurgista**

**P R E S E N T A**

Jennyfer Ariadna Chávez Cervantes

**DIRECTOR DE TESIS**

Doctor Faustino Juárez Sánchez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## *Dedicatoria*

*A mis padres:*

*Adelaida, la mejor y más hermosa figura femenina, tú me enseñaste a ser valiente, cálida y amorosa. Eres y serás siempre mi ejemplo a seguir.*

*Eduardo, el apoyo y amor que me has dado no se compara con el de ninguna otra persona, enseñándome siempre el valor de la perseverancia y honestidad.*

*A mi querida hermana Dafne, que siempre me ha brindado su mano ante cualquier situación, por tolerar mis locuras y aun así quererme.*

*A Enrique Gutiérrez por ser mi compañero en todo este proceso, en convencerme de no rendirme y de encontrar en ti todas las palabras de aliento; por otorgarme tu confianza y de compartir conmigo momentos tan maravillosos.*

*A Jessie Álvarez por ser la mejor amiga que me he podido encontrar, siempre haciéndome reír y por ser mi más grande confidente.*

*Faustino Juárez Sánchez, mi gran guía desde el servicio social, una persona digna de admiración, talentosa y empática; le agradezco todo el conocimiento y apoyo que me ha brindado.*

# Contenido

Resumen .....	5
Summary .....	6
Introducción .....	7
CAPÍTULO I.....	9
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES .....	9
Antecedentes .....	9
Sitio de Estudio .....	10
Hidrografía:.....	10
Orografía: .....	11
Geología:.....	11
La Haciendita BE-13.....	13
CAPÍTULO II.....	14
MARCO TEÓRICO .....	14
Concentración gravimétrica.....	14
Mesa concentradora: .....	15
Fuerzas a las que es sometido el mineral:.....	16
Operación de las mesas concentradoras:.....	18
Rifles .....	19
Cinemática y dinámica de la partícula .....	23
Ley de Stokes y su resistencia al movimiento .....	26
Principio de Vanner.....	29
CAPÍTULO III.....	30
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	30
Caracterización del mineral, análisis granulométrico, trituración y molienda .....	30
Trituración.....	35
Molienda .....	38
Construcción de mesa concentradora y configuración de rifles.....	40
Configuración de los rifles.....	45
CAPÍTULO IV .....	48
RESULTADOS EN LA MESA CONCENTRADORA.....	48

Resultados de análisis de laboratorio .....	52
Cálculo de fuerzas actuantes .....	53
CAPÍTULO V .....	56
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	56
REFERENCIAS .....	58

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo ser una alternativa para la concentración de oro nativo proveniente del municipio de Luvianos, Edo. de México; con la ayuda de la separación por diferencia de densidades en una mesa concentradora modificada en la disposición y geometría de sus rifles. Este mineral presenta ciertas particularidades que no permiten una concentración eficiente en una mesa concentradora convencional, como son las concentraciones bajas de metales preciosos, formación de suspensiones en agua y la gran cantidad de limos, arcillas y ceniza en la roca.

En este estudio se incluye el análisis de cabeza de las muestras, sus parámetros de trituración y de molienda, la construcción de una mesa concentradora modificada, el proceso de concentración de las muestras, el análisis químico de los concentrados, el estudio de las fuerzas actuantes y finalmente, los resultados obtenidos.

Lo innovador que se presenta en esta mesa son las zonas de transición a las que está sujeto este mineral, permitiendo una mayor separación de las partículas, disminuyendo el consumo de agua, tiempo y energía en su concentración debido a la simplicidad de efectuar varios procesos en uno solo.

Aquí se definen los mejores parámetros encontrados para trabajar en la mesa fabricada, sin embargo, cualquier variación en cada uno de ellos arrojará resultados muy diferentes, por lo que es importante considerar que se requiere de controles rigurosos para obtener los resultados deseados. La definición de parámetros operativos en la mesa concentradora es un proceso que requiere de mucha observación, de constante supervisión, de una gran cantidad de pruebas y de un análisis minucioso en los resultados.

## Summary

The objectives of this present work are to be an alternative for the concentration of native gold from the municipality of Luvianos, Estado de Mexico; with the help of the separation by difference of densities in a concentrating table modified in the disposition and geometry of their riffles. This mineral has certain characteristics that do not allow efficient concentration in a conventional concentrating table, such as low concentrations of precious metals, formation of suspensions in water and the large amount of silt, clay and ash in the rock.

This study includes the head analysis of the samples, their crushing and grinding parameters, the construction of a modified concentrating table, the concentration process of the samples, the chemical analysis of the concentrates, the study of the acting forces and finally, the results obtained.

The innovative presented in this table are the transition zones to which this mineral is subject, allowing a greater separation of the particles, decreasing the consumption of water, time and energy in its concentration due to the simplicity of carrying out several processes in only one.

Here we define the best parameters found to work on the manufactured table, however, any variation in each of them will yield very different results, so, it's important to consider that rigorous controls are required to obtain the desired results. The definition of operational parameters in the concentrator table is a process that requires a lot of observation, constant supervision, a large amount of tests and a thorough analysis of the results.

## Introducción

El uso de mesas concentradoras como método de separación gravimétrica ha sido utilizado desde la antigüedad, evolucionando constantemente con el fin de cumplir diferentes objetivos como son concentrar metales de diferentes densidades, trabajar con diversas granulometrías del mineral, ofrecer una mayor capacidad de alimentación, etc. Gracias a todos estos objetivos que se han perseguido y que conjuntamente se ha observado el aumento en la necesidad de metales, es que se han planteado diferentes diseños de mesas concentradoras, este trabajo cita y compara dos diseños de mesas concentradoras que son La Mesa Wilfley y La Mesa Butchart presentando la modificación en la geometría y distribución de sus rifles y por lo tanto un comportamiento dinámico distinto de la partícula.

Este trabajo tiene como objetivo principal la recuperación de oro diseminado encontrándose en el yacimiento con una muy baja ley, al lograr la recuperación del oro se alcanzaría otro de los objetivos de este trabajo que es ofrecer una alternativa económica y sencilla para un mayor alcance en las comunidades con este recurso natural.

La mesa que se presenta en este trabajo funciona mecánicamente como las mesas propuestas anteriormente, sin embargo, como se había mencionado, lo innovador es la configuración y geometría de los rifles, se plantea una modificación en ellos colocándolos en la mayor parte del tablero para asegurar la continuidad del mineral pero al mismo tiempo con una ligera curvatura y cambios en su dirección para crear un radio de agitación y obtener un “lavado” del mineral pudiéndose concentrar oro en baja ley.

Si bien no es tan sencillo el determinar valores para los diferentes parámetros de la mesa concentradora, este diseño fue ensayado con diversos parámetros con la finalidad de determinar las mejores condiciones operativas de la misma, esta serie de ensayos se realizaron con el fin de recuperar la mayor cantidad de oro diseminado y ofrecer un trabajo mucho más sencillo para que el que la utilice tenga conocimiento suficiente en su funcionamiento.

### Planteamiento del problema:

El mineral para trabajar en este estudio contiene la presencia de oro diseminado y altos contenidos de limos, arcillas y cenizas que no permiten una correcta separación de las partículas, afectando el proceso de extracción e incrementando el costo de beneficiado de éste.

### Hipótesis:

La recuperación de oro diseminado en el mineral es posible mediante el método gravimétrico de la mesa Wilfley, sin embargo, para este mineral en específico, con alto contenido de partículas finas, se requiere del uso de una mesa modificada en la geometría de la disposición de los rifles, pudiéndose separar los limos y ganga en una forma más eficiente.

### Objetivos:

- 1) Construcción de una mesa con zonas de mezclado que permita separar las partículas de oro de los limos y ganga, a partir de la diferencia de densidades.
- 2) Que la mesa propuesta sea una alternativa para la concentración de metales preciosos por empresas que no cuenten con equipos muy mecanizados.

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

### Antecedentes

El oro ha sido uno de los metales más preciados a lo largo de la historia por encontrarse en forma nativa y por sus propiedades maleables y dúctiles; el hombre ha encontrado diversos usos de éste en áreas como medicina, aeronáutica, electrónica, pero principalmente y desde tiempos ancestrales, en la fabricación de joyería debido a su brillo, resistencia a la corrosión y maleabilidad como ya se había menciona antes.

De acuerdo con Marsden y House (1993), se muestra una tabla con los datos históricos más relevantes de este elemento.

Fecha	Acontecimiento
3050 a.C.	Egipto utiliza oro para la fabricación de monedas
2700 a. C.	Se registran trabajos ornamentales con este elemento en Mesopotamia
1300 a. C.	Inicio de extracción de oro en depósitos aluviales
1000 a. C.	Descubrimiento de amalgamación con mercurio
1000 d. C.	La Minería decae por la caída del imperio Greco-Romano
1400 d. C.	Se retoma el proceso de amalgamación y se descubre el proceso retorta
1550 d. C.	Colonias como México, Sudáfrica, Colombia, Perú y Bolivia resultan ser más atractivas para la explotación de metales que Europa incluso por lo distancia
1693 d. C.	Se descubren las minas de Gerais en Brasil
1400-1600 d. C.	Explotación de Oro en el oeste de África, China, Japón e India
1783 d. C.	Descubrimiento de la solubilidad del oro en cianuro
1790 d. C.	Se inician trabajos de adsorción de oro por carbón
1867 d. C.	Rae (U.U.S.S.A.A.) patenta un proceso de lixiviación de oro y plata con cianuro.
1889 d. C.	Construcción de las primeras plantas de cianuración
1904 d. C.	Merril propone la utilización de Zn para la precipitación de oro
1952 d. C.	Mejoramiento del proceso por carbón y Electrowinning
1970 d. C.	Primera operación de lixiviación por pilas en USA
1985 d. C.	Primera planta no ácida para la recuperación de oro
1990 d. C.	Utilización de planta bio-oxidación para todo el proceso de tratamiento

Tabla 1. Acontecimientos relevantes del Au

## Sitio de Estudio

Municipio de Luvianos, Estado de México.

Municipio de reciente formación, erigido de 1994 hasta 2002, perteneciente con anterioridad al municipio de Tejupilco con 28, 213 habitantes (INEGI, 2009); Los servicios con los que cuenta son electrificación, asistencia médica, presa para riego, acueducto para uso doméstico, etc.

De acuerdo con el diagnóstico ambiental del municipio de Luvianos, Estado de México (2006) Luvianos se localiza en la parte sur del estado, en las coordenadas 98° 53'45" (mínima) 98°55'50" (máxima) longitud oeste y 19°43'33" (mínima) 19°36'40" (máxima) latitud norte, a una altura de 1,300 metros sobre el nivel del mar.

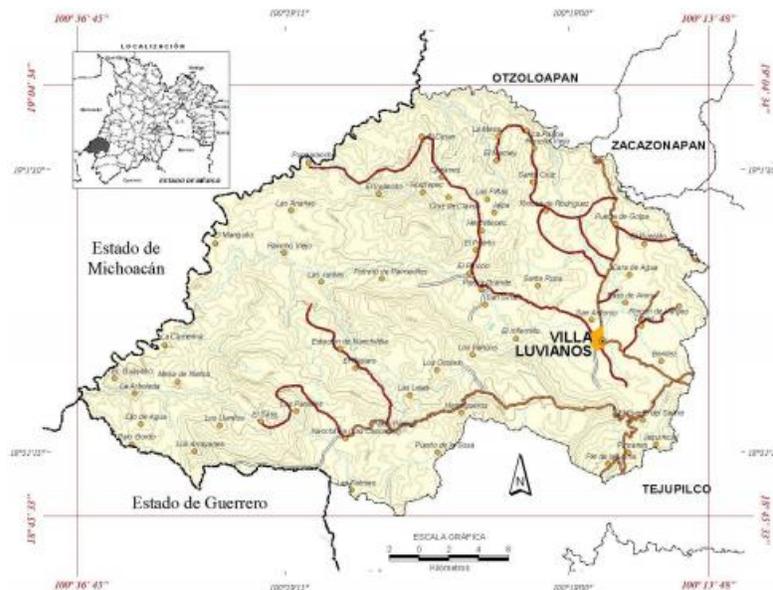


Figura 1. Colindancia de municipios (Diagnóstico ambiental, Secretaría de Medio Ambiente 2006)

### Hidrografía:

El municipio forma parte de la cuenca del Río Cutzamala que a su vez pertenece a la región Hidrológica del Río Balsas, Luvianos cuenta con ríos, arroyos y manantiales que abastecen a los pobladores y a sus actividades agrícolas.

Los ríos más importantes con los que cuenta son el río Temascaltepec (18Ga02), río Pungaracho (18Ga03), río Bejucos (18Gb11), río Chiquito (18Gb02) y Rincón del

Guayabal(18Gb01); así como los ríos son de corriente permanente, Luvianos cuenta también con arroyos de caudal permanente como Acatitlán, El Salto, San Antonio y Palo Gordo.

(Secretaría del Medio Ambiente, 2006)

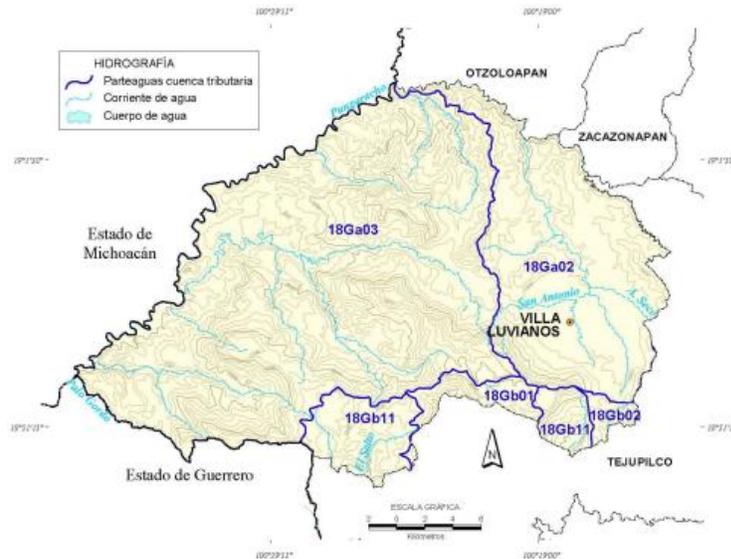


Figura 2. Hidrografía del municipio de Luvianos, Edo. De México (Diagnóstico ambiental, Secretaría de Medio Ambiente, 2006)

### **Orografía:**

Cuenta con una orografía muy abrupta perteneciente a la Sierra Madre del Sur, la Sierra de Pericones que tiene origen en el municipio y prolonga hasta el Puerto de Salitre donde se levanta la Sierra de Nanchititla o Cinacantla, lugar donde se encuentra el parque natural de recreación popular llamado con el mismo nombre, un atractivo turístico importante debido a la fauna y flora del lugar así como los paisajes que ofrece. Por el norte y con la misma dirección, desprendiéndose de la sierra de Temascaltepec, penetra con la Sierra de la Cumbre, el Cerro de Cacalotepec, El Cardosanto, Jumiltepec, El Fraile y La Rayuela; hay cañadas formando así el valle fértil donde se encuentra el poblado de San Martín Luvianos.

### **Geología:**

De acuerdo a (Morán, 1985) la zona de estudio perteneciente a la Sierra Madre del Sur, forma parte de una región con alta complejidad estructural, constituida por afloramientos de secuencias mesozoicas tanto sedimentarias como volcánico-sedimentarias, estas zonas abarcan el noroccidente de Guerrero, el occidente del estado de México y sur de Michoacán; conforman afloramientos vulcano-sedimentario del Jurásico y Cretácico principalmente metamorfosados cubiertos por rocas volcánicas y sedimentarias continentales del cenozoico.

El Centro Volcánico de la Sierra de Nanchititla ubicado al norte de la localidad Bejucos y al oeste del municipio de Tejupilco que se encuentra precisamente en el área de estudio, es un centro volcánico aislado cuyo basamento está compuesto por una secuencia metavulcanosedimentaria de esquisto de Tejupilco intrusionado por un batolito y cubierto por conglomerados y areniscas de la formación Cutzamala. Estos conglomerados a su vez se encuentran cubiertos en gran medida de lavas máficas, derrames y mesas de lava, domos endógenos e ignimbritas con espesor de aproximadamente 200 metros intrusionadas por domos riolíticos. Las rocas que afloran en el centro volcánico de la Sierra de Nanchititla son lavas andesítico-basálticas, andesíticas-porfídicas, dacíticas, riolíticas, rocas producto de flujos piroclásticos y cuerpos hipabisales (González, 2007).

Según el Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI, 2009), en el municipio de Luvianos, Estado de México, el porcentaje petrográfico es el siguiente:

- Ígnea extrusiva: riolita-toba ácida (32.46%), riolita (4.49%), granito (2.98%), basalto (2.74%), toba ácida-brecha volcánica ácida (1.1%), granodiorita (0.99%), brecha volcánica ácida (0.53%), toba ácida (0.48%), brecha volcánica básica (0.27%) y dacita-toba ácida (0.01%)
- Metamórfica: metavolcánica (29.55%) y metasedimentaria (2.0%)
- Sedimentaria: arenisca-conglomerado (22.0%)

LOCALIDAD	COORD NAD27 UTM-X	COORD NAD27 UTM-Y	SUSTANCIA
Capulines	347760	2092190	Au, Zn, Sb, Pb
El Mentidero	348700	2092198	Au, Zn, Pb
El Morro	48298	2090440	Zn, Pb, Ag
San Nicolás	351020	2087850	Ag, Pb, Zn
Paso del Burro	342136	2087845	Cu, Ag
El Potrero	346012	2082106	Cu
El Potrero 1	355998	2081907	Cu
El Limón	357286	2078364	Cu
La haciendita BE-13	358394	2073684	Cu, Au
La compuerta	355612	2076706	Fe, Cu, Pb
Santa Rosa 1	358077	2097169	Cu, Zn
Puerto de la Sosa	352350	2085220	Pb, Ag
Santa RosaBE-17	358177	2096971	Cu, Ag

Tabla 2. Localidad de minerales metálicos en Luvianos, Edo. De México. (Diagnóstico ambiental, 2006)

### La Haciendita BE-13

La Haciendita se localiza en las coordenadas UTM-X: 358,394 y UTM-Y: 2'073,684 a 4.55 km en línea recta al SE 31° del Centro de Salud Las Anonas, Amatepec.

La Haciendita es un rebaje a cielo abierto desarrollado en meta-caliza y meta-arenisca de la unidad KapaMCz-Mar, para cortar un fracturamiento mineralizado con abundante malaquita granular, escasa calcita cristalizada y pirita diseminada, y porciones con abundante oxidación.

(Piñeiro, 2011).



Figura 3. Fotografía del tajo en la localidad La Haciendita, Luvianos, Edo. de México

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### Concentración gravimétrica

Gupta y Yan (2016) mencionan que forma parte de una de las técnicas más antiguas para la separación de minerales, se cree que la separación de oro data de los 3000 a.C. debido a escritos encontrados por los egipcios, sin embargo, este proceso se ha formado sin presencia del ser humano ya que, como proceso natural de la meteorización de las rocas y la liberación de partículas, los minerales viajan por las corrientes de agua gracias a fuertes lluvias que acontecen.

La separación por gravedad está basada en la diferencia de las velocidades de sedimentación y su diferencia entre densidad y tamaño; el éxito es que permiten una separación, pero manteniéndose cerca unas de otras para poderse mover con relación y poderse separar en capas de partículas densas y ligeras.

Es importante saber que no todos los minerales son susceptibles a esta separación y para eso existe un criterio de concentración que mencionan Gupta y Yan (2016) de mucha ayuda para saber si es o no factible su separación por concentración gravimétrica:

$$\text{Criterio de Concentración (CC): } \frac{\text{SG de mineral denso} - \text{SG del fluido}}{\text{SG del mineral liviano} - \text{SG del fluido}}$$

Donde SG significa la densidad relativa y el fluido normalmente es agua o aire.

A continuación se muestran algunos ejemplos de este Criterio de Concentración donde se puede ver que mientras el valor sea más alto será más adecuada la concentración gravimétrica:

Mineral	Fluido	CC
Oro	Agua	10.3
Oro	Aire	6.8
Casiterita	Agua	3.5
Carbón	Agua	3.4
Hematita	Agua	2.5

Tabla 3. Fuente: (Gupta y Yan, 2016)

Criterio de Concentración	Posible separación por gravedad
$CC > 2.5$	Fácil para 75 $\mu\text{m}$
$1.75 < CC < 2.5$	Posible para 150 $\mu\text{m}$
$1.5 < CC < 1.75$	Posible para 1.7 mm
$1.25 < CC < 1.5$	Posible para 6.35 mm
$CC < 1.25$	Imposible para cualquier tamaño

Tabla 4. Fuente: (Gupta y Yan, 2016)

Como técnicas para la concentración gravimétrica más relevantes se encuentran:

- Jigs
- Mesas concentradoras
- Ciclones e hidrociclones
- Separadores de partículas finas

Mesa concentradora:

Las mesas concentradoras forman parte de las técnicas para la concentración gravimétrica más eficientes según diversos autores, consiste en separar las partículas en la superficie de la mesa mediante su sacudimiento longitudinal, y la inclinación del tablero de la misma; es a menudo, encontrar mesas con rifles que ayudan a la sedimentación de las partículas, estos rifles se encuentran en el mercado con distintos diseños y básicamente sus diferencias en diseño radican para ayudar a sedimentar ciertos diámetros y densidades de las partículas.

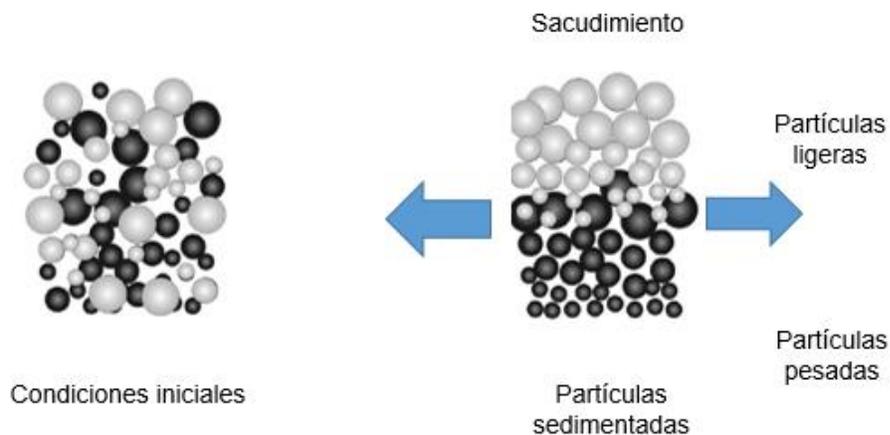


Figura 4. Segregación de partículas debido al movimiento horizontal. (Gupta y Yan, 2016).

Conforme a (Wills, 1988), si se considera un determinado número de esferas rodando sobre un plano inclinado, las que tengan un diámetro mayor viajarán más rápido que las que tengan un diámetro menor aunque tengan la misma densidad, si tienen el mismo diámetro, la más ligera

viajará más rápido; así que, debido al análisis anterior para la mesa concentradora es importante calcular el tiempo que tardará la partícula en rodar hasta el final de la mesa.

Debido a las particularidades físicas del mineral, la alimentación quedará dividida en tres productos:

- 1) Partículas gruesas ligeras las cuales se moverán más rápido hacia el final de la mesa (colas)
- 2) Partículas de mineral ligero, partículas de mineral denso y partículas densas que no se liberaron de las ligeras (medios)
- 3) Partículas finas densas (concentrado) las cuales se mueven lentamente en el tablero

Es muy importante mencionar también que en el diseño de una mesa se tenga en cuenta que si el movimiento lateral que se ejerce sobre el mineral se aplica simétricamente en ambas direcciones, cada partícula se moverá con una distancia igual y la separación en los rifles no se llevará a cabo.

Fuerzas a las que es sometido el mineral:

Gaudin (1939) explica que existen tres fuerzas a las que se ve sometida una partícula en una mesa concentradora y son el empuje de la partícula debido a la gravedad, el roce entre las partículas y finalmente el empuje del fluido.

Empuje de la partícula debido a la gravedad:

$$F_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 \text{sen} \alpha (\Delta - \Delta') g$$

Dónde:

r= Radio promedio de la partícula

$\Delta'$  =Densidad relativa del fluido

$\Delta$ =Densidad relativa del mineral

g= Fuerza de gravedad

Roce entre las partículas:

$$F_2 = -\frac{4}{3} \pi r^3 \Phi \cos(\Delta - \Delta') g$$

$\Phi$

= coeficiente de fricción estática o coeficiente de fricción dinámica dependiendo si se encuentra en movimiento

Empuje del fluido

Es importante para esta ecuación tomar en cuenta que la resistencia al movimiento de una partícula está en función de la velocidad relativa del fluido y la partícula, entonces para obtener el empuje que ejerce el fluido sobre la partícula será mediante la suma de todos los elementos que la afectan y que la velocidad será diferente dependiendo de la profundidad a la que se encuentre, así que la fórmula es la siguiente:

$$F_3 = -\frac{9}{2} \pi k \Delta' g \text{sen} \alpha r^3 + 6 \pi k \Delta' g \text{sen} \alpha (\theta r^2) - 6 \pi \mu r v$$

k= coeficiente designado para las partículas no esféricas (muy cercano a 1)

v= velocidad de la partícula respecto a la cubierta de la mesa

Kelly y Spottiswood (1990) definen ciertas variables en la mesa concentradora:

Variables de diseño:

- Forma de la mesa
- Material de la superficie de la mesa
- Forma de los rifles
- Patrón de distribución de los rifles
- Aceleración y desaceleración
- Alimentación

Propiedades mecánicas:

- Velocidad del motor
- Tamaño de la polea

Revoluciones:

- Ajuste de la conexión articulada o vibrador

Controles de operación:

- Inclinación de la mesa
- Densidad de la pulpa de alimentación
- Agua de lavado
- Posición de los partidores del producto

(Kelly y Spottiswood, 1990)

Operación de las mesas concentradoras:

La vibración se logra gracias a un mecanismo que hace girar una banda y esa banda convierte el movimiento rotatorio en un movimiento horizontal que permite el sacudimiento longitudinal de la mesa.

Debido a las tantas variables a las que se ven sujetas las mesas concentradoras, existen una gran cantidad de diseños y modificaciones diferentes para alcanzar diversos objetivos para cada una, por lo que en este trabajo se hablará solo de la mesa Wilfley y mesa Butchart como un comparativo en su eficiencia para un mineral en común.

Mesa Concentradora Wilfley (1895-1896)

Mesa diseñada para la concentración de minerales de alta densidad, es uno de los diseños más utilizados en la industria debido a su alta eficiencia. Consiste en un tablero (generalmente rectangular) inclinado transversalmente recubierto de caucho o madera sobre una base de madera o metálica, es en la parte superior derecha del tablero donde la mesa es alimentada con mineral; en la parte superior del tablero, el agua para el lavado de minerales distribuida en el mismo para que con ayuda de un “sacudimiento longitudinal” y rifles colocados estratégicamente el mineral podrá ser sedimentado y clasificado mayoritariamente por su densidad. La importancia de que esté recubierto de caucho es debido a que permite el correcto deslizamiento y lavado de mineral.

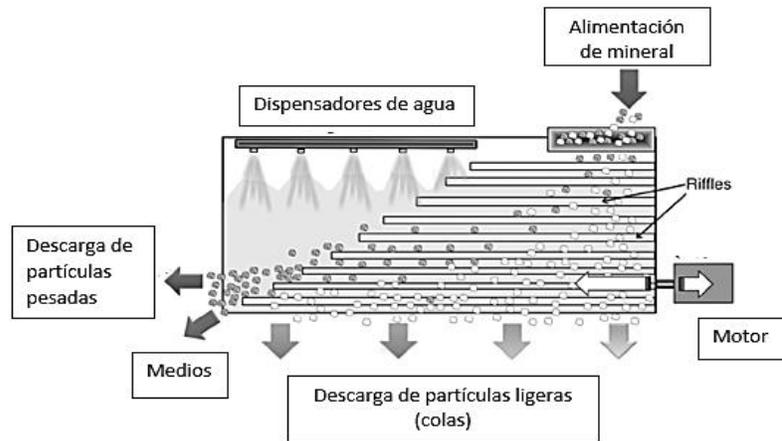


Figura 5. Proceso de concentración en mesa concentradora Wilfley. (Gupta y Yan, 2016)

### Rifles

Taggart (1945), expuso que los ríflles son tacos de madera con un espesor de  $\frac{1}{2}$  pulgada al inicio de la alimentación que va disminuyendo a medida que ésta se aleje del sistema de sacudimiento, usualmente, su ancho es de  $\frac{1}{4}$  de pulgada. El final de los ríflles forma una línea diagonal entre ellos, que ocupan alrededor de  $\frac{2}{3}$  partes del tablero, dejando sin ríflles  $\frac{1}{3}$  del tablero, es necesario destacar que es el tipo de configuración de mesa Wilfley más común existiendo otros tipos de configuración de ríflles.

Ejemplos de disposición de ríflles en mesas Wilfley:

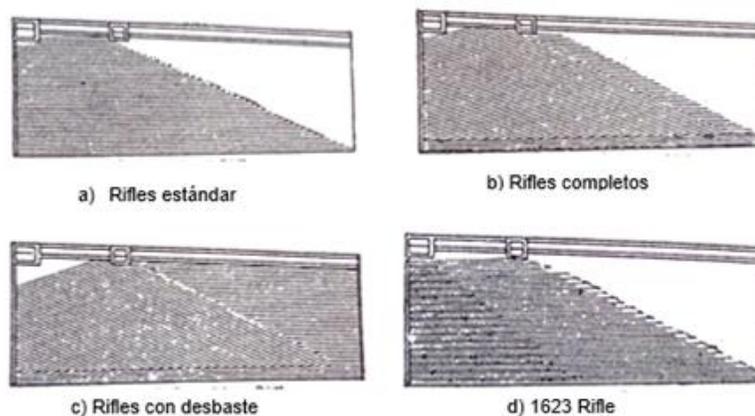


Figura 6. Diferentes configuraciones de ríflles en mesas Wilfley. (Taggart, 1945)

### **Principios aplicados en la mesa concentradora:**

- 1) La alimentación dependerá de la densidad del mineral, de su forma y tamaño.
- 2) El correcto espaciamiento entre rifles promoverá o facilitará la estratificación de los minerales
- 3) La vibración debe aumentar poco a poco en dirección axial a la descarga
- 4) La porción inicial de la mesa debe terminar con suficiente brusquedad para promover cierto arrastre de las partículas a la zona de descarga
- 5) El paro de la mesa debe ser gradual reduciendo poco a poco y gentilmente las revoluciones
- 6) Los parámetros de la mesa deben ser elegidos con la correcta amplitud y frecuencia
- 7) Los rifles deben ser diseñados con una determinada forma y espaciados para promover la estratificación y prevenir que el concentrado se traslade con la corriente de agua hasta la zona de colas
- 8) Los rifles deben retener mineral, sin embargo, es necesario que permitan el libre traslado de partículas y estos no sirvan como una “pared”.
- 9) La relación entre sólido-líquido debe mantenerse estable.
- 10) Es necesario establecer y mantener un ángulo de inclinación de la mesa

*(Wills, 1988)*

Ventajas:

- Altamente selectiva, modificable si se utiliza correctamente
- Puede estar sujeta a muchas modificaciones

Desventajas:

- Baja capacidad, Requiere de una gran área
- Requiere supervisión constante y ajuste
- La alimentación tiene que ser cuidadosamente calculada.

### **Mesa concentradora Butchart (1914)**

Ésta es muy similar a la mesa Wilfley a diferencia de que cuenta con otra disposición en el diseño de rifles, todo el tablero se encuentra con rifles, sin embargo, existe una zona con rifles diagonales que permiten un mayor “lavado” del mineral.

El tablero de la mesa está dividido en tres zonas.

- 1) Zona de estratificación: Donde los rifles tienen mayor profundidad que permite la estratificación del mineral.
- 2) Zona de lavado donde está inclinado hacia la zona de alimentación (ésta desviación en combinación con la inclinación de la mesa produce una corriente en los rifles que fluye en dirección inversa a aquella en la que el material se mueve por el impulso del mecanismo)
- 3) Zona de descarga: Normalmente esta zona en el tablero se encuentra sin rifles, sin embargo, en esta mesa toda el área tiene rifles para asegurar la rápida y eficaz descarga de concentrado.

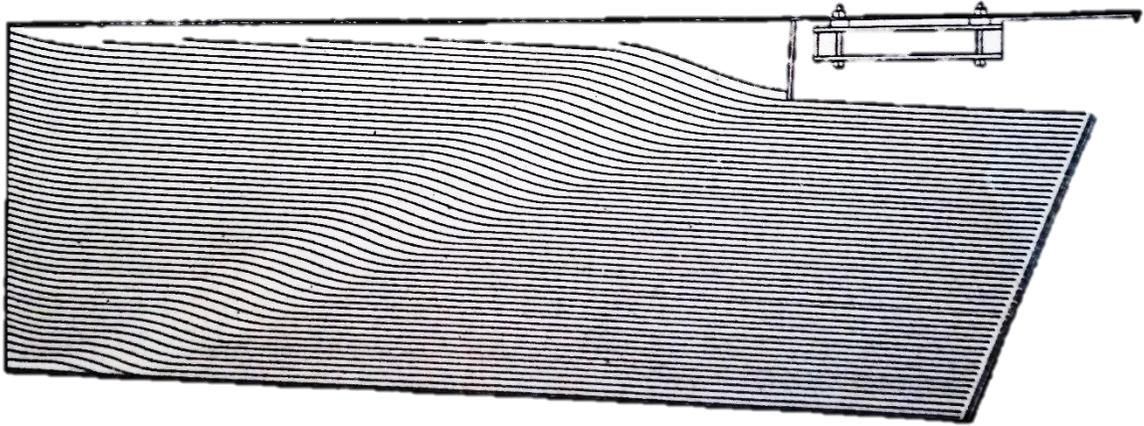


Figura 7. Mesa concentradora Butchart. (Richards y Locke, 1940)

Operación: Richards y Locke (1940), indican que una vez que se adiciona el mineral y comienza a tener contacto con el agua en la zona de alimentación, el mineral es lavado de rifle a rifle, los rifles más ricos en mineral concentrado son los primeros 15 ya que comienzan a enriquecerse con concentrado sedimentado y el resto del concentrado se queda en el rifle posterior. El objetivo es recuperar la mayor cantidad de concentrado y el concentrado que no se sedimenta en los rifles será atrapado al fondo de la mesa.

Efectos de los rifles diagonales: Debido a este diseño en el área de lavado se dice que se produce una “sacudida lateral” similar al resultado de un vanner en el que se da una estratificación y limpieza en el rifle más eficaz (se explicará más adelante el efecto de un Vanner).

Ventajas de la mesa Butchart:

- 1) La clasificación por granulometría no es completamente necesaria pero sí básica para el correcto funcionamiento de la mesa concentradora, será necesario retirar los limos (>150 mallas)
- 2) La capacidad de esta mesa es mayor, comúnmente se le puede alimentar de 100-200 toneladas por mesa al día.
- 3) El material que es considerado para la alimentación del Jig puede ser utilizado para esta mesa.
- 4) La recuperación de concentrado es mayor que la mesa Wilfley.

### Cinemática y dinámica de la partícula

El modelo a continuación expone la trayectoria de las partículas en la mesa, la trayectoria es el resultado de las fuerzas vectoriales en movimiento a través de los planos x,y,z; es importante considerar ésta última parte ya que cada partícula al chocar contra un rifle presenta un movimiento de cascada semejante al que se encuentra en los molinos, por lo cual, el arrastre con el flujo de agua dependerá también de la posición de la partícula en el eje y, esto es que de acuerdo a la ley de Stokes se tiene un asentamiento diferencial debido a la densidad de las partículas presentes y al medio que en este caso es agua. En un momento dado es despreciable el coeficiente de fricción con la superficie y el rifle por lo que es aplicado un modelo de tiro parabólico que nos describe la trayectoria de la partícula en el plano cartesiano.

Aceleración instantánea: Es la aceleración que se toma en un punto específico ya que la aceleración no es constante y puede variar, se puede identificar gráficamente como la

pendiente de la gráfica velocidad respecto al tiempo o como la segunda derivada respecto al tiempo:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2x}{dt^2}$$

Velocidad media de una partícula con aceleración constante:

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_{xi} + v_{xf})$$

Posición de una partícula en función de la velocidad y tiempo con aceleración constante

$$X_f = x_i + \frac{1}{2}(v_{xi} + v_{xf})t$$

Posición como función del tiempo en el movimiento rectilíneo uniforme (con aceleración constante):

$$X_f = x_i + v_{xi}t + \frac{1}{2}a_x t^2$$

Velocidad como función de la posición:

$$v_{xf}^2 = v_{xi}^2 + 2a_x(x_f - x_i)$$

Tiro parabólico

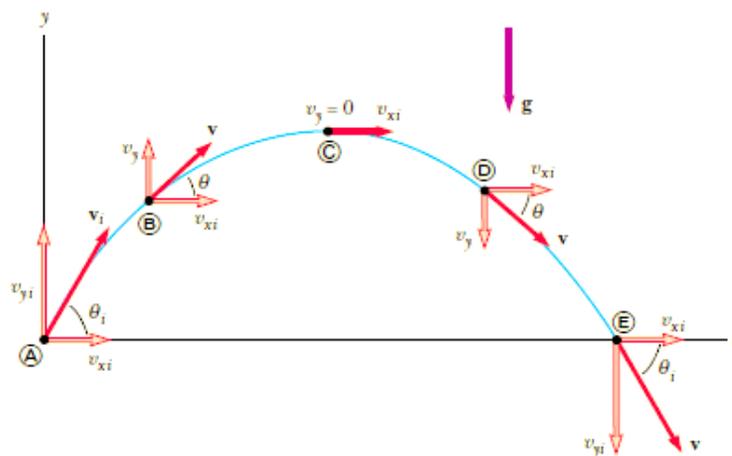


Figura 8. Componentes de los vectores en el tiro parabólico

Posición en función del tiempo:

$$x_f = x_i + v_{xi}t = (v_i \cos \theta_i)t$$

$$y_f = y_i + v_{yi}t = (v_i \sin \theta_i)t - \frac{1}{2}gt^2$$

Velocidad en función del tiempo

$$v_{xf} = v_{xi} = v_i \cos \theta_i$$

$$v_{yf} = v_{yi} - gt = v_i \sin \theta_i - gt$$

Expresión vectorial para la posición

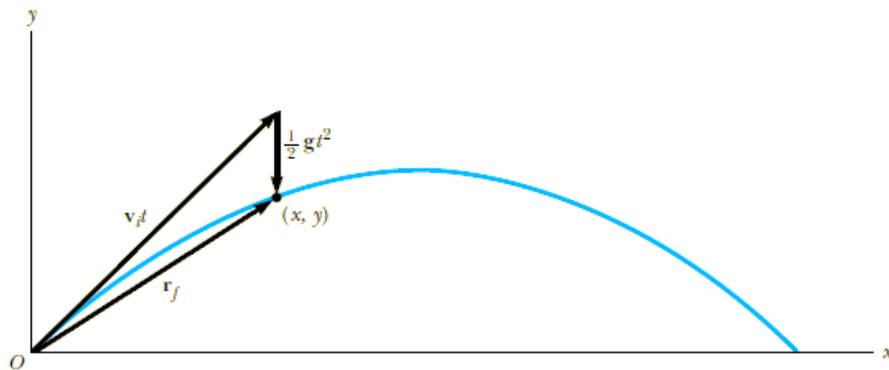


Figura 9. Posición vectorial en tiro parabólico

$$\vec{r}_f = \vec{r}_i + v_i t + \frac{1}{2}at^2$$

Ecuación de distancia "r":

$$r = \frac{v_i^2 \sin(2\theta_i)}{g}$$

(Serway y Jewett, 2008)

En el año de 1939, Gaudin realizó una recopilación de las fórmulas necesarias para comprender el movimiento de partículas en un fluido en los métodos de separación gravimétrica, las fórmulas que a continuación se presentan son las más relevantes para entender la dinámica de la partícula en las mesas concentradoras.

## Ley de Stokes y su resistencia al movimiento

Conocida como ecuación de la sedimentación y nos da el valor de la velocidad terminal de sedimentación de esferas pequeñas ( $270-30\mu$ ) en función del radio de la partícula, su densidad y la viscosidad del fluido (comúnmente aire o agua)

$$v_t = \frac{2 \Delta - \Delta' r^2 g}{9 \mu}$$

$$R = 6\pi\mu r v$$

Dónde:

$v_t$  = Velocidad terminal

$\Delta'$  = Densidad relativa del fluido

$g$  = Aceleración de la gravedad

$\mu$  = Viscosidad del fluido

$r$  = Radio de la esfera

$R$  = Resistencia al movimiento

$\Delta$  = Densidad relativa del mineral

$v$  = Velocidad

(Todo expresado en unidades c.g.s.)

Gaudin (1939) menciona que la velocidad que se puede calcular con métodos numéricos no es exacta ni igual para todo el fluido ya que la fricción que ejerce el aire sobre la superficie hace que la velocidad disminuya, por lo que se puede decir que, la velocidad no es totalmente uniforme en todo el espesor de la capa del agua y es el principal fundamento de que el flujo en la mesa es laminar.

Debido a lo anterior, para calcular la velocidad de un fluido se tomará una distancia del espesor del fluido menor al real para poder tener un valor más certero ( $y$ ), esta velocidad es por supuesto una velocidad terminal alcanzada después de que la película ha alcanzado una aceleración constante:

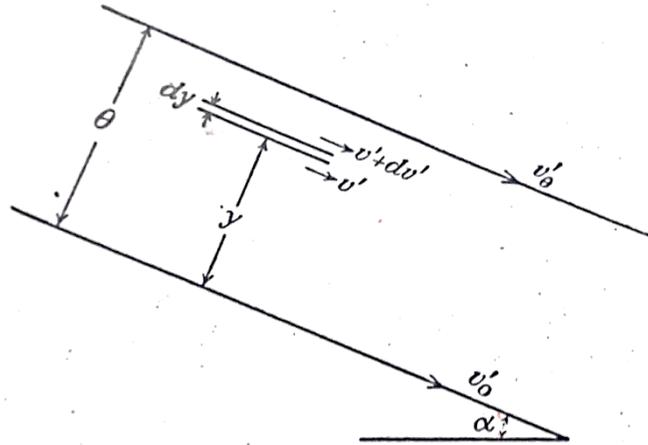


Figura 10. Velocidad de un fluido en un flujo laminar

$$v' = \frac{\Delta' g \text{sen} \alpha}{2\mu} (2\theta - y)y$$

Dónde:

$\Delta'$  = Densidad relativa

$g$  = Aceleración de la gravedad

$\mu$  = Viscosidad del fluido

$\alpha$  = Ángulo del fluido respecto a la horizontal

$\theta$  = Espesor del fluido

$y$  = Distancia en la profundidad del fluido

$v'$  = Velocidad de acuerdo con el espesor del fluido

Factor de sedimentación de acuerdo a su forma con la misma densidad, mismo tamaño pero diferente forma:

$$\frac{V_t \text{ Particula}}{V_t \text{ esfera}}$$

$V_t$  = Velocidad terminal

Volumen de fluido por unidad de tiempo:

$$W = \frac{\Delta' g \text{sen } \alpha}{3\mu} \theta^3$$

Espesor del fluido en la mesa:

$$\theta = \left[ \frac{(3\mu)(W)}{\Delta' g \text{sen } \alpha} \right]^{1/3}$$

Aceleración de la partícula:

Para poder obtener la aceleración a la que estará sujeta la partícula en una mesa concentradora será necesario tomar en cuenta todas las fuerzas que se ejercen sobre ella, para ello se realizará una suma de las fuerzas citadas anteriormente ( $F_1, F_2$  y  $F_3$ ) a lo largo de todo el plano inclinado (tablero de la mesa), simplificando la ecuación se tiene:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\Delta - \Delta'}{\Delta} g (\text{sen } \alpha - \Phi \text{cos } \alpha) - \frac{9}{2} \mu k \frac{v}{\Delta r^2} + \frac{9}{2} k \frac{\Delta'}{\Delta} g \text{sen } \alpha \frac{\theta}{r} - \frac{27}{8} k \frac{\Delta'}{\Delta} g \text{sen } \alpha$$

Pendiente crítica debajo de la cual no se produce el deslizamiento:

De acuerdo a la ecuación anterior la aceleración de la partícula en una mesa concentradora es la suma de las tres fuerzas que se ejercen sobre ella pero si en esa misma ecuación se considera que  $\frac{dv}{dt} = 0, v = 0$ , despejando  $\alpha$  se puede determinar el ángulo crítico que se entiende como el ángulo mínimo para que la partícula pueda sedimentarse:

$$\cot\alpha_{\text{crit}} = \frac{\frac{9}{2}k \frac{\Delta'}{\Delta-\Delta'} \frac{\theta}{r} - \frac{27}{8}k \frac{\Delta'}{\Delta-\Delta'} + 1}{\Phi_s}$$

La relación entre la gravedad específica del sólido, su tamaño, el coeficiente de fricción entre el sólido y el tablero de la mesa, y el espesor de la película de agua no será lo único que afecte a esta fórmula del ángulo crítico, éste tendrá que aumentar o disminuir la velocidad de flujo de fluido, con disminución del espesor de la película, con aumento en el tamaño de partícula, con aumento en la gravedad específica, etc.

### Principio de Vanner

El objetivo del Vanner es crear un radio de agitación, las colas contienen partículas muy finas de concentrado con alta densidad que con ayuda de la agitación logra sedimentarlas; en el libro de los autores Richards, R. y Locke mencionan que el radio de agitación es una relación entre el diámetro de los minerales pesados y ligeros, mostrando el siguiente ejemplo:

En una serie de pruebas con concentrado de cuarzo y galena se obtuvieron con mayor frecuencia los siguientes radios de agitación (galena a cuarzo):

Concentrado	1.95:1
Medios	3.09:1
Colas	1:1.95

RPM del motor:

Para poder calcular las revoluciones por minuto de un motor es necesario calcular el torque que es la fuerza que el motor aplica a un eje para hacerlo girar y los caballos de fuerza de éste.

$$T = (\text{lb} * \text{ft})$$

$$\text{RPM} = \text{HP} * 5252 / T$$

## CAPÍTULO III

### DESARROLLO EXPERIMENTAL.

#### **Caracterización del mineral, análisis granulométrico, trituración y molienda**

El material y equipo empleado en este trabajo fue:

- Mineral del sitio de estudio
- Trituradora de quijadas marca Denver
- Molino de Bolas
- RoTap
- Balanza electrónica
- Cuarteador de cono
- Set de Cribas
- Placa de policarbonato
- Madera
- Base de motor y mesa
- Microscopio
- Estufa
- Trampas para mineral
- Sistema de filtración al vacío
- Papel filtro

## Caracterización del mineral

Caracterización física del mineral	Propiedades químicas del mineral
Nombre de la roca: Toba riolítica	Alto índice de oxidación
Densidad: 1.94 g/cm <sup>3</sup>	Sin reactividad al ácido
Color: Marrón claro, ocre	Formación de suspensiones
Raya: ocre	
Dureza: 2 (debido a una alteración)	
Textura: Cristalina afanítica	
Minerales identificados: Pirolusita, Jarosita, Hematita, Cuarzo, Feldespatos Potásicos, Pirita, entre otros.	

TABLA 5. Características físicas y químicas del mineral

## Análisis granulométrico

Las muestras de llegada fueron divididas en dos partes, una se guardó como testigo y se procedió a trabajar en la otra. Antes de realizar el análisis granulométrico se llevó a cabo la homogeneización y cuarteo del mineral por el método de cono-cuardeo (figura 11 y 11.1), posteriormente se cribó el mineral en un set de cribas con una progresión geométrica de  $\sqrt{2}$  para conocer su granulometría inicial.

Nomenclatura de la muestra:

Número:060417 ,Lvn, LY A-101



Figura 11. Homogeneizado y cuarteo del mineral empleando el método de cono-cuardeo.



Figura 11.1. Separación de cuartos para tener una muestra representativa

Una vez que se obtuvo una muestra representativa del método de cono-cuardeo se seleccionaron un conjunto de tamices en orden descendente de acuerdo con la progresión geométrica de  $\sqrt{2}$  como se indicó anteriormente. Es importante mencionar que se utilizaron los tamices que más se asemejaban al resultado de las progresiones debido a la disponibilidad con los que se contaban.



Figuras 12 y 12.1 Análisis granulométrico

No. de malla	Tamaño de la abertura (in)	Tamaño de la abertura ( $\mu\text{m}$ )	Masa (gr)	% Retenido	% Ac (-)	% Ac(+)	Tamaño (log $\mu\text{m}$ )	Log %Ac(-)
7/8	7/8	22225	38.4	7.72	100.00		4.35	2.00
3/4	3/4	19050	32.1	6.46	92.28	7.72	4.28	1.97
5/8	5/8	15875	49	9.86	83.69	14.18	4.20	1.92
1/2	1/2	12700	60.1	12.09	75.97	24.03	4.10	1.88
1/3	1/3	8382	78	15.69	63.88	36.12	3.92	1.81
0.22	0.22	5588	54.8	11.02	48.19	51.81	3.75	1.68
4	0.185	4699.00	18.3	3.68	37.17	62.83	3.67	1.57
6	0.131	3327.4	17.4	3.50	33.49	66.51	3.52	1.52
7	0.111	2819.4	14.6	2.94	29.99	70.01	3.45	1.48
8	0.0937	2379.98	11.5	2.31	27.05	72.95	3.38	1.43
10	0.0669	1699.26	25.4	5.11	24.74	75.26	3.35	1.39
12	0.0661	1678.94	8.1	1.63	19.63	80.37	3.23	1.29
16	0.0469	1191.26	17.9	3.60	18.00	82.00	3.08	1.26
20	0.0331	840.74	14.5	2.92	14.40	85.60	2.92	1.16
35	0.0197	500.38	18.9	3.80	11.48	88.52	2.70	1.06
50	0.0117	297.18	12.3	2.47	7.68	92.32	2.47	0.89
-50	Fondo	-297.18	25.9	5.21	5.21	94.79		0.72
			497.2	100.00				

Tabla 6. Granulometría inicial del mineral

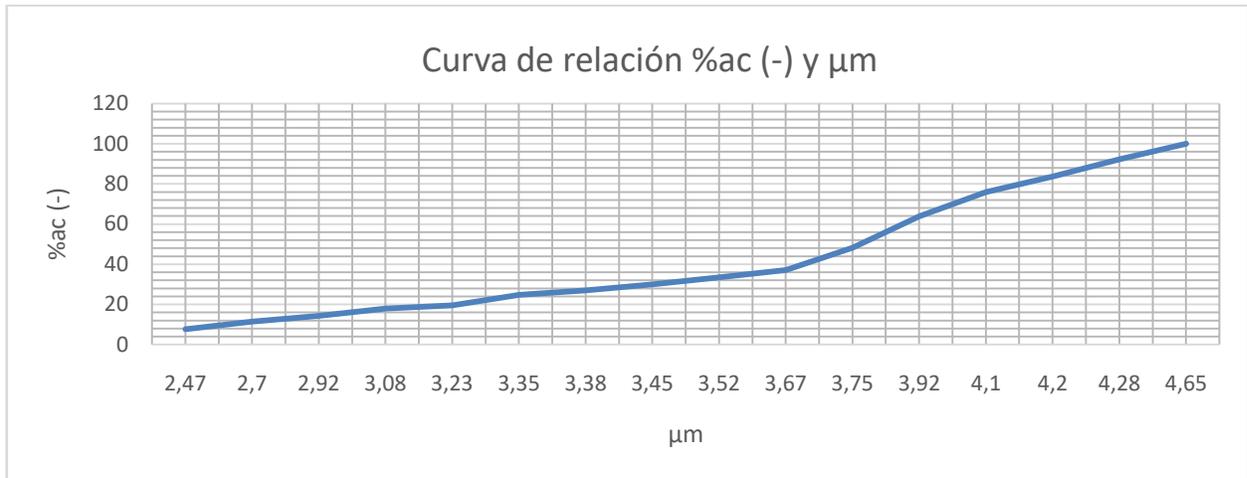


Figura 13. Distribución del %ac (-) y  $\mu\text{m}$  de la cabeza del mineral.

### Trituración

Interpolación para obtener  $F_{80}$

Se tomó al eje X como la columna de *Log Tamaño de la abertura promedio ( $\mu\text{m}$ )* de la tabla anterior y al eje Y como *Log %Ac(-)*, por lo que:

$$X = X_a + (Y - Y_a) \left( \frac{X_b - X_a}{Y_b - Y_a} \right)$$

$$X_a = 4.24$$

$$Y_a = 1.92$$

$$X_b = 4.15$$

$$Y_b = 1.88$$

$$Y = \log 80 = 1.90$$

Sustituyendo:

$$X = 4.24 + (1.90 - 1.92) \left( \frac{4.15 - 4.24}{1.88 - 1.92} \right)$$

$$X = 4.19$$

$$X = 15\ 488.16\mu\text{m}$$

No. de malla	Tamaño de la apertura (in)	Tamaño de la apertura (µm)	Masa (gr)	% Retenido	%Ac (-)	%Ac(+)	Log Tamaño de la apertura (µm)
½	1/2	12700	18.70	6.31	100		4.10
1/3	1/3	8382	74.5	25.15	93.69	6.31	3.92
0.22	0.22	5588	48.8	16.48	68.53	31.47	3.75
4	0.185	4699.00	21.8	7.36	52.06	47.94	3.67
6	0.131	3327.4	32.4	10.94	44.70	55.30	3.52
7	0.111	2819.4	11.3	3.81	33.76	66.24	3.45
8	0.0937	2379.98	21.7	7.33	29.95	70.05	3.38
10	0.0669	1699.26	5.8	1.96	22.62	77.38	3.23
12	0.0661	1678.94	11.1	3.75	20.66	79.34	3.23
16	0.0469	1191.26	9.1	3.07	16.91	83.09	3.08
20	0.0331	840.74	10.4	3.51	13.84	86.16	2.92
35	0.0197	500.38	3	1.01	10.33	89.67	2.70
70	0.0117	297.18	9.6	3.24	9.32	90.68	2.47
100	0.0059	150	5.1	1.72	6.08	93.92	2.18
200	0.0029	75	5.6	1.89	4.36	95.64	1.88
Fondo	-0.0029	-75	7.3	2.46	2.46	97.54	
			296.20	100.00			

Tabla 7. Análisis representativo de tamices del mineral una vez triturado

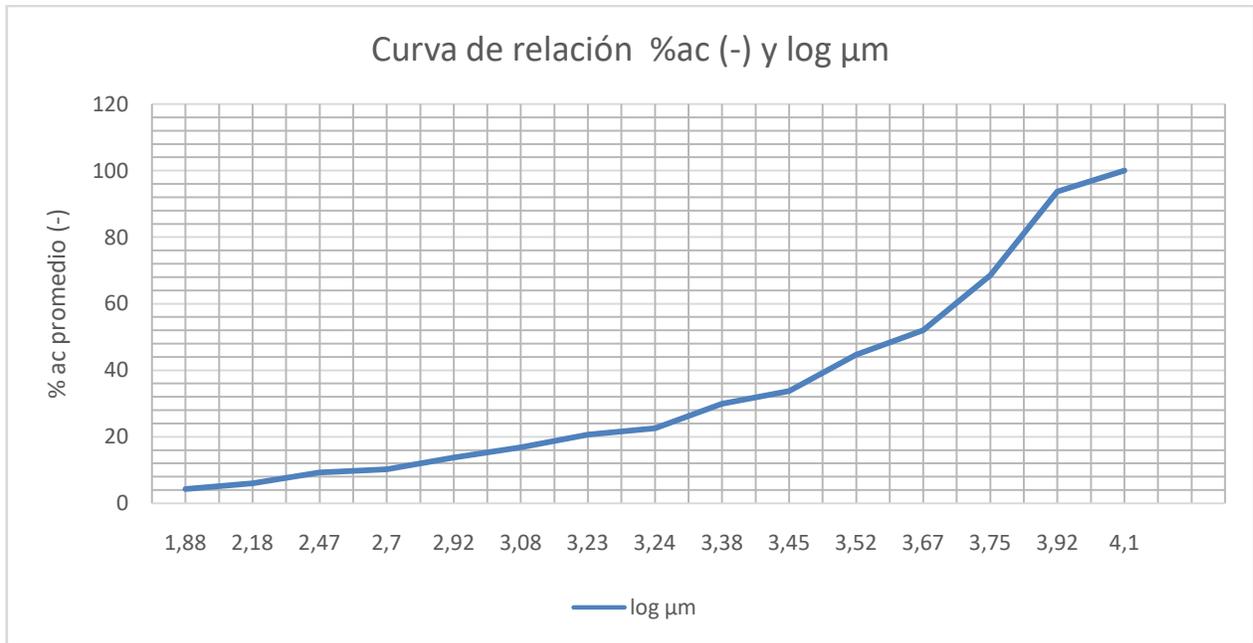


Figura 14. Distribución %ac (-) y  $\mu\text{m}$  después de la trituración

Realizando la misma fórmula de interpolación anterior se tiene que el P80 después de la trituración es:

$$\text{Log } P_{80} = 3.92$$

$$P_{80} = 8, 383.01 \mu\text{m}$$

Parámetros de la trituración	Cantidad
Tiempo de trituración (s)	17
Masa triturada (kg)	1.93
Capacidad de trituración (T/h)	0.41
$F_{80}$ entrada a la trituradora ( $\mu\text{m}$ )	15 488.16 $\mu\text{m}$
$P_{80}$ salida de la trituradora ( $\mu\text{m}$ )	8, 383.01 $\mu\text{m}$

Tabla 8. Parámetros de trituración

## Molienda

Se utilizaron las fórmulas de Espinosa de León y López (1984), así como las de Huezco (1996) para establecer los parámetros de molienda de donde se obtuvieron los siguientes parámetros

Parámetros de la molienda	
F80 entrada molino ( $\mu\text{m}$ )	8, 383.01
P80 Salida molino ( $\mu\text{m}$ )	297.18
Velocidad crítica (rpm)	92.31
RT (F80/P80)	1.85
Carga de bolas (kg)	8.02
W (demanda de operación en Kwh/T)	0.38
Wi (índice de trabajo en Kw)	73.05
Diámetro de tamaño de bola (in)	3
Relación agua/mineral	2:1
Tiempo de molienda (min)	9

Tabla 9. Parámetros de molienda

Una vez realizada la molienda se procedió a eliminar las lamas presentes en el mineral, este proceso consume alrededor de 40-50 litros de agua por cada 0.5 kg de mineral, es un dato muy importante y que representa un gasto de agua considerable que no tiene que ver con una sobre molienda sino con las características propias del mineral, sin embargo, como ya se verá más adelante en el desarrollo de la mesa concentradora que se propone es una alternativa también para eliminar este proceso que puede implicar altos consumos de agua y tiempo en el proceso de remover lamas del mineral.

A pesar de no ser un aparato muy certero debido a sus resultados muy puntuales, se prueba el mineral con un analizador de fluorescencia de rayos X portátil cuyo principio responde a la difracción de rayos X, es una prueba muy local y que arroja resultados sólo de la pequeña área de lectura del cristal donde se emite el rayo, sin embargo, proporciona una idea de los elementos que se encuentran en el mineral anticipando posibles anomalías.

## Concentraciones de cabeza

Después del proceso de molienda se prepararon las muestras para analizarlas por la técnica del ICP, a continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron para oro:

Muestra	Peso (g)	(mg Au/kg de muestra)
A-101	0.425	0.0000047
A-107	0.4145	ND
A-111	0.4041	0.0000091
A-112	0.4088	ND
A-123	0.4063	0.0000049
A-124	0.4112	ND
A-125	0.4013	ND
A-126	0.4202	ND
A-128	0.4104	0.0000049
A-130	0.4021	ND

Tabla 10. Concentraciones de cabeza, donde ND significa No Detectado

El	PPM	+/-
Zn	716	57
Mn	1220	250
Al	2.85%	0.10
Si	6.23%	0.13
P	420	68
S	358	48
K	1293	58
Ca	2145	57
Fe	4.34%	0.10

Fig. 15. Resultados del analizador XRD para muestra A-101

El	PPM	+/-
Ag	21	6
Zn	497	64
Mn	3230	360
Mg	2.32%	0.75
Al	4.68%	0.17
Si	7.85%	0.20
P	1350	110
S	740	75
K	507	74

Fig. 15.1. Resultados del analizador XRD para muestra A-128

## **Construcción de mesa concentradora y configuración de rifles**

Se utilizó una base de madera a la cual se le realizó una limpieza profunda y sellado de huecos y grietas empleando resanador y sellador, ya seco el resanador se niveló lo que sería el tablero para finalmente recubrirlo con una cubierta deacrílico cortado a la medida para proteger la mesa de los posibles efectos de la humedad y ofrecer un tablero óptimo para el deslizamiento de mineral. Así mismo, se fabricaron los partidores de producto y tolva para mineral, todo en acrílico. Posteriormente, se instalaron en la parte superior de la mesa concentradora que servirá para distribuir uniformemente el agua y el mineral longitudinalmente.

### Herramientas y materiales utilizados

- Lijas para madera
- Resanador para madera
- Pintura acrílica color negro
- Acrílico negro con espesor de 9 mm
- Pijas, Tornillos, tuercas y rondanas
- Thinner
- Adecri (pegamento para acrílico)
- Sierra eléctrica
- Lijadora
- Pegamento 5000
- Juego de desarmadores
- Taladro y brocas
- Vernier
- Flexómetro

En las figuras 16y 16.1 se pueden observar las condiciones iniciales en las que se encontró la madera, por ser de reuso tenía algunos surcos producto de la humedad, óxido en las láminas de acero y algunas piezas que ya no podían utilizarse (maderas, clavos, pijas, cubierta de vinil):



Figura 16. Madera dañada por humedad

Una vez que se retiraron las partes inservibles, se procedió a resanar, lijar y nivelar la mesa como se muestra en la figura 16.1:



Figura 16.1. Trabajos iniciales de la restauración

Se utilizó una hoja de acrílico negro con espesor de 9 mm para recubrir la mesa concentradora, fabricar los partidores y tolva para el mineral:



Figura 17. Ensamble de acrílicos

Fabricación de tolva para mineral y partidor.



Figura 17.1. Tolva



Figura 17.2. Partidor de acrílico

Una vez fijados los acrílicos, se atornillaron los partidores



Figura 17.3 Construcción de mesa concentradora

Vista preliminar de la mesa concentradora ya terminada:



Figura 17.4. Mesa instalada

Dimensiones de la mesa concentradora

Área= 0.445 m<sup>2</sup>

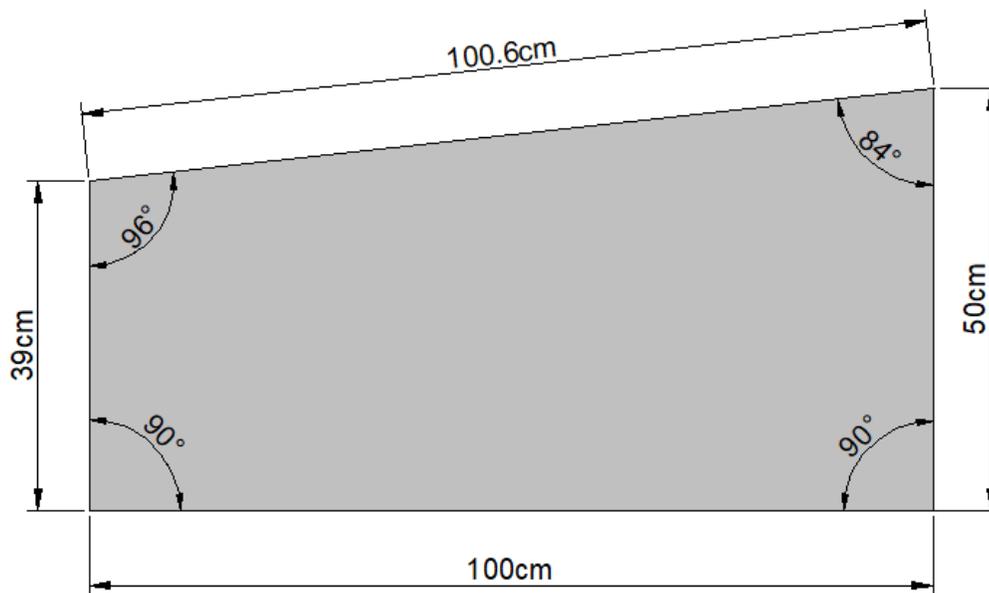


Figura 17.5 Dimensiones finales de mesa concentradora

## **Configuración de los rifles**

Para la configuración de los rifles se tomaron en cuenta diferentes aspectos, es necesario tener en claro que la construcción de la mesa es para poder obtener una mayor concentración de oro respecto a una mesa concentradora convencional, por lo que, las características físicas tendrán un papel fundamental en la selección de sus elementos. Según los resultados obtenidos en la caracterización del mineral, los rifles que se diseñaron tienen como finalidad lograr la sedimentación de partículas finas principalmente.

De acuerdo con Taggart (1945), las mesas con una disposición de rifles en todo su tablero (generalmente profundos) son de gran ayuda para tratar grandes toneladas de mineral fino con mineral grueso con una ley muy baja, donde el mineral que se busca concentrar se encuentra regularmente en el mineral fino. Debido a esta afirmación se justifica la configuración de rifles en todo el tablero, además, se busca asegurar la continuidad de concentrado durante todo el tablero.

Se planteó la siguiente configuración:

El tablero se dividió en dos partes transversalmente para la clasificación de colas, partículas densas y ligeras (medios), y partículas densas (concentrado) denominadas como área A y área B.

Ya que el tablero se dividió en dos partes iguales, se colocaron una serie de rifles rectos paralelos y otra de curvos equidistantes longitudinalmente dentro de toda el área A y área B y con separaciones de 2 cm y 3 cm respectivamente.

Se cree que la curvatura de los rifles proporcionará una liberación mayor de partículas del resto de mineral logrando una mayor sedimentación en los rifles. Las dimensiones de cada rifle así sean rectos o curvos son de ancho y alto de 4 mm con largos diferentes.

Fabricación de rifles

Se fabricaron rifles de madera de pino provisionales ya que por su facilidad de elaboración resultaron ser el material más versátil permitiendo la modificación en ellos durante las pruebas de laboratorio; para evitar que se alteren sus propiedades durante las pruebas, se les adicionó sellador y pintura blanca y poder ser pegados al tablero.



Figura 18 y 18.1 Elaboración de Rifles



Figura 19 y 19.1 Colocación de rifles en el tablero

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS EN LA MESA CONCENTRADORA

Una vez que la mesa fue montada, se realizaron diversas pruebas en la mesa concentradora con la finalidad de obtener diferentes variables que son la mejor geometría y disposición de los rifles, determinar la correcta granulometría, la inclinación más apropiada, las revoluciones por minuto, alimentación y el flujo de agua.

Las primeras pruebas que se realizaron tuvieron como objeto visualizar que se efectuara una distribución en la mesa construida por lo que primeramente se tomaron muestras de arena de mar del estado de Baja California Sur, estas muestras resultaron ser estratégicas por su facilidad para observar que se clasifican por diferencia de densidades, sin embargo, no es la muestra que se busca clasificar, por lo que, una vez que se observaron estas muestras de arena clasificadas por color en la mesa fabricada (el color en este caso resulta ser el indicador de que se clasifica por diferencia de densidades) se decidió clasificar con muestras preparadas del mineral de interés.

Un dato muy importante y crucial que se observó durante la búsqueda de las variables óptimas de trabajo de la mesa es que si se coloca directamente mineral sin deslamar, éste se separará de las lamas dejando las partículas finas en los rifles rectos mientras que el concentrado y los medios se separarán en los rifles curvos, este resultado es determinante para el ahorro en el consumo de agua y tiempo para el proceso, a continuación se presenta una fotografía de partículas finas en los rifles rectos:



Figura 20. Partículas sedimentadas en rifles rectos

Para definir los parámetros de trabajo de la mesa concentradora se realizaron diferentes pruebas en donde se fue variado de uno en uno los parámetros, el orden fue el siguiente:

- 1) Ángulo de inclinación
- 2) Revoluciones por minuto
- 3) Flujo de agua
- 4) Alimentación
- 5) Ángulo de inclinación de donde se encuentra el motor hacia la zona de descarga de concentrado

En la siguiente tabla se presentan algunas de las pruebas que se realizan en la mesa:

El día 13 de junio del 2018 se comenzó a realizar las pruebas y se trabajó de la siguiente manera

Primera prueba		Segunda Prueba	
Muestra	Arena de mar	Muestra	A-101 Luvianos
Densidad	2.14 g/cm <sup>3</sup>	Densidad	1.94 g/cm <sup>3</sup>
Alimentación	100 gr	Alimentación	100 gr
RPM	400	RPM	400
Inclinación de la mesa	-2°	Inclinación de la mesa	-2°
Flujo	50% (9.45 l/m)	Flujo	50% (9.45 l/m)
Tercera prueba		Cuarta prueba	
Muestra	A-101 Luvianos	Muestra	A-101 Luvianos
Densidad	1.94 g/cm <sup>3</sup>	Densidad	1.94 g/cm <sup>3</sup>

Alimentación	100 gr	Alimentación	100 gr
RPM	400	RPM	400
Inclinación de la mesa	-3°	Inclinación de la mesa	-4°
Flujo	50% (9.45 l/m)	Flujo	50% (9.45 l/m)

15/junio/2018

Una vez que se definió el ángulo se continua con pruebas de variación de revoluciones por minuto

Primera prueba		Segunda Prueba	
Muestra	A-101 Luvianos	Muestra	A-101 Luvianos
Densidad	1.94 g/cm <sup>3</sup>	Densidad	1.94 g/cm <sup>3</sup>
Alimentación	100 gr	Alimentación	100 gr
RPM	450	RPM	500
Inclinación de la mesa	-3°	Inclinación de la mesa	-3°
Flujo	50% (9.45 l/m)	Flujo	50% (9.45 l/m)
Tercera prueba		Cuarta prueba	
Muestra	A-101 Luvianos	Muestra	A-101 Luvianos
Densidad	1.94 g/cm <sup>3</sup>	Densidad	1.94 g/cm <sup>3</sup>
Alimentación	100 gr	Alimentación	100 gr
RPM	550	RPM	400
Inclinación de la mesa	-3°	Inclinación de la mesa	-3°
Flujo	50% (9.45 l/m)	Flujo	50% (9.45 l/m)

Tabla 12. Pruebas en mesa concentradora (2)

El día 23 de julio del 2018 se realizan pruebas para el flujo de agua y posteriormente alimentación, en el caso de la alimentación se partieron de los cálculos de Wills, B. (1988) donde propone un rango de alimentación de acuerdo con el área del tablero, y al tamaño de la partícula

Promedio $\frac{lb}{ft^2}$ por hora de alimentación	Tamaño de partícula	Tipos de concentrado
60	20-200 mallas	Mesas concentradoras
30	150-400 mallas	Mesas concentradoras

		para limos y vanners
--	--	----------------------

De acuerdo con las características del mineral se decide comenzar con la alimentación de  $30 \frac{lb}{ft^2}$ , lo que correspondería a 63 kg/hora debido al área del tablero, sin embargo, este dato sólo era teórico ya que al momento de llevarlo a la práctica no se separaban adecuadamente los limos ni tampoco permitía a las partículas sedimentarse, por lo que se siguieron haciendo pruebas de alimentación hasta que se llegó al dato de 4.5 kg/hr.

El día 3 de Agosto del 2018 se gestionó cambiar la altura de los rifles así como su geometría para verificar si efectivamente eran los parámetros más apropiados, se redujeron los rifles de 4 a 3 mm de altura y se redujo la longitud de los rifles curvos pero los resultados no fueron los esperados, debido al cambio de altura a 3 mm las partículas ya no se sedimentaban en las paredes de los rifles pasando la mayoría del material directamente a las colas, mientras que, el poco material que lograba concentrarse se mezclaba con los medios al final del tablero. Debido a estos resultados se llegó a la conclusión de que las condiciones iniciales donde la altura de los rifles es de 4 mm y los rifles curvos se encuentren hasta el final del tablero de la mesa eran las mejores condiciones para trabajar.

Además, se encontró una variable más que es el ángulo de inclinación de donde se encuentra el motor hacia la zona de descarga de concentrado que también se contempló con la finalidad de asegurar la continuidad del mineral hasta su descarga.

Después de analizar diferentes variables se llegó a la estandarización de parámetros óptimos de trabajo de la mesa concentradora fabricada:

Estandarización de parámetros operativos para la mesa concentradora	
Muestra	A-101 Luvianos
Densidad	1.94 g/cm <sup>3</sup>
Alimentación	4.5 kg/hr
RPM	450
Inclinación de la mesa	-3°
Inclinación de mesa de motor a descarga	-1.1
Flujo	55% (10.39l/m)

Tabla 13. Parámetros establecidos para la mesa concentradora



Figura 21. Fotografía del concentrado obtenido después de trabajar con los parámetros mencionados



Figura 22. Diferencia en la coloración de mineral entre rifles

### Resultados de análisis de laboratorio

Una vez obtenido el concentrado de los depósitos situados en la parte superior izquierda de la mesa concentradora; se realizaron los análisis de ICP para oro, los resultados son los siguientes:

Muestra	Concentración (mg/L)	Peso (g)	(mg Au/kg muestra)
A-101	0.6241	0.5	124.82
A-107	0.7438	0.5061	146.96
A-111	0.6813	0.508	134.12
A-112	0.723	0.5035	143.59
A-123	0.6605	0.5074	130.18
A-124	0.8114	0.5088	159.47
A-125	0.9883	0.5085	194.35
A-126	0.9675	0.509	190.08
A-128	1.212	0.5064	239.34
A-130	0.8062	0.5	161.24

Tabla 14. Resultados de concentración de Au en las muestras una vez concentradas

### Cálculo de fuerzas actuantes

Para calcular la velocidad terminal de la partícula será necesario emplear la siguiente ley de Stokes:

$$v_t = \frac{2 \Delta - \Delta' r^2 g}{9 \mu}$$

Dónde:

$v_t$  = Velocidad terminal

$\Delta'$  = Densidad relativa del fluido

$g$  = Aceleración de la gravedad

$\mu$  = Viscosidad del fluido

$r$  = Radio de la esfera

$R$  = Resistencia al movimiento

$\Delta$  = Densidad relativa del mineral

Sustituyendo

$$v_t = \frac{2 \left( 1,940,000 - 1,000,000 \frac{g}{m^3} \right) (9 * 10^{-5} m)^2 (9.81 \frac{m}{s^2})}{9 \frac{1 \frac{g}{m * s^2} * s}{m * s^2}}$$

$$v_t = 0.0165 \frac{m}{s}$$

La resistencia al movimiento será:

$$R = 6\pi\mu r v$$

Sustituyendo:

$$R = 6(3.1416) \left( 1 \frac{g}{m * s^2} * s \right) (9 * 10^{-5} m) \left( 0.0165 \frac{m}{s} \right)$$

$$R = 2.799 * 10^{-5} \frac{g * m}{s^2}$$

$$R = 2.799 * 10^{-8} N$$

Gracias a estos dos parámetros se pueden calcular las fuerzas ejercidas en el mineral

### 1) Empuje por gravedad:

$$F_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 \text{sen} \alpha (\Delta - \Delta') g$$

Donde:

r= Radio promedio de la partícula

$\Delta'$  = Densidad relativa del fluido

$\Delta$ = Densidad relativa del mineral

$\alpha$ = Ángulo de inclinación de la mesa

Sustituyendo

$$F_1 = \frac{4}{3} (3.1416) (9 * 10^{-5})^3 \text{sen} 3^\circ \left( 1,940,000 - 1,000,000 \frac{g}{m^3} \right) \left( 9.81 \frac{m}{s^2} \right)$$

$$F_1 = 1.4642 * 10^{-9} N$$

### 2) Roce entre partículas

Coefficiente de fricción cinética=0.052= $\phi$

$$F_2 = -\frac{4}{3} \pi r^3 \phi \text{cos} \alpha (\Delta - \Delta') g$$

Sustituyendo

$$F_2 = -\frac{4}{3} (3.1416) (9 * 10^{-5} m)^3 (0.052) \text{cos} 3^\circ \left( 1,940,000 - 1,000,000 \frac{g}{m^3} \right) \left( 9.81 \frac{m}{s^2} \right)$$

$$F_2 = -1.4613 * 10^{-9} N$$

### 3) Empuje del Fluido

$$F_3 = -\frac{9}{2} \pi k \Delta' g \text{sen} \alpha r^3 + 6 \pi k \Delta' g \text{sen} \alpha (\theta r^2) - 6 \pi \mu r v$$

Sustituyendo

k= Coeficiente designado para las partículas no esféricas (muy cercano a 1)

$\theta$  = Espesor de la capa de agua = 5 mm =.005 m

$$\begin{aligned}
F_3 = & -\frac{9}{2} (3.1416)(.999) \left(1,000,000 \frac{g}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) \text{sen}3^\circ (9 * 10^{-5})^3 \\
& + 6(3.1416)(.999) \left(1,000,000 \frac{g}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) \text{sen}3^\circ (.005m)(9 \\
& * 10^{-5}m)^2 - 6(3.1416) \left(1 \frac{g}{m * s^2} * s\right) (9 * 10^{-5}m) \left(0.0165 \frac{m}{s}\right) \\
F_3 = & 2.8446 * 10^{-9}N
\end{aligned}$$

Aceleración será igual a la suma de las tres fuerzas que se ejercen

$$\frac{dv}{dt} = F_1 + F_2 + F_3$$

$$\frac{dv}{dt} = 2.8476 * 10^{-9}N$$

## CAPÍTULO V

### ÁNÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La hipótesis de que este mineral puede ser concentrado mediante diferencia de densidades con una mesa concentradora modificada como la que se propuso en este trabajo, se comprobó con los resultados arrojados por el ICP, las concentraciones de cabeza contra las del producto de la mesa son totalmente diferentes, inclusive en muestras donde no se detectó la presencia del Au.

Como se pudo observar en los resultados por el ICP, no existe una gran variabilidad en los mismos, esto es debido a que el tablero sufrió un ligero daño provocando que el mineral sedimentara en una pequeña depresión que no permitió que parte del mineral se depositara en las celdas de concentrado. Con la finalidad de no alterar los resultados, se despreciaron los sólidos contenidos en esa depresión a pesar de ser parte del concentrado.

Ya que la mesa tiene rifles en todo su tablero puede hacer que el mineral no tan fácil pase de rifle a rifle, pero teniendo en cuenta que el mineral a concentrar (Au) se encuentra a tan bajas concentraciones, es necesario asegurarse de que la menor cantidad de este mineral se deposite en las celdas de los medios y colas. El motivo por el que la mesa se elaboró con acrílico y no de otro material fue para disminuir la fricción de la partícula respecto al tablero, las partículas a concentrar son tan pequeñas y poco perceptibles que puede ser mayor la fricción que la fuerza que ejerce su peso, quedando estancadas en el tablero sin depositarse en ninguna celda.

La problemática de separar partículas tan finas se vio resuelta gracias a la zona de transición entre área "A" y "B", mandando las partículas finas (limos sin contenido de Au) a la zona "A" y finalmente, a la zona de descarga de las colas; mientras que, el mineral con contenidos de Au (ya en área "B") tuvo una zona más de transición en el vértice de la parábola formada por los rifles, permitiendo un "lavado" extra del mineral separando las partículas más densas del resto. Este fenómeno no se había visto en mesas concentradoras con rifles tipo Wilfley. El uso de la mesa concentradora es una alternativa

desde hace varias décadas para la concentración de minerales, una condición obligatoria del mineral a concentrar es que su densidad debe ser muy diferente a la del fluido y al de los minerales de ganga presentes.

Si bien no es fácil controlar las variables a las que debe de trabajar una mesa concentradora, puede ser una alternativa bastante retribuable a un proceso que requiere de un bajo consumo de energía respecto a otros, ciertamente es una técnica antigua pero que puede ser muy versátil y que con las tecnologías y avances de la actualidad puede ser modificada continuamente, cabe la posibilidad como se había mencionado antes de incluir ciertos reactivos que puedan mejorar este proceso.

Gracias al cálculo de las fuerzas actuantes se puede conocer el comportamiento de nuestra partícula y así definir las necesidades de diseño, son resultados muy teóricos y sujetos a diversas variables, pero son el fundamento para la elaboración de una mesa concentradora; estos resultados son el parteaguas para la comprensión del funcionamiento de una mesa y nos demuestra el papel fundamental que ejerce la fricción, la gravedad, el sacudimiento y los diferentes ángulos trabajados.

Este trabajo sólo se enfocó en la separación de los minerales cuyas propiedades físicas lo permitieran, sin embargo, sería muy interesante adicionar reactivos que intensifiquen el proceso, ayudando a deprimir o a flotar ciertos minerales presentes; esto quiere decir que podrían aumentar los costos de concentración pero que los beneficios se pueden reflejar en la disminución de costos de energía debido al tiempo de permanencia en la mesa y a las recirculaciones de mineral.

Este trabajo requirió de una investigación exhaustiva de autores que ya habían estudiado el caso desde inicios del siglo XX, siendo muy sorprendente no encontrar información reciente, los procesos actuales ofrecen una capacidad de concentración muy alta, y en este caso, la capacidad en volumen de una mesa concentradora no puede competir contra la capacidad de las tecnologías modernas, pero para la pequeña minería que no tiene acceso a tantas herramientas o equipos tan mecanizados que requieren de procesos relativamente sencillos, éste proceso puede ser una opción.

## REFERENCIAS

### Libros

1. Kelly, E. y Spottiswood, D., (1990), *Introducción al procesamiento de minerales*. Traducción de Rafael García. México, Limusa.
2. Wills, B., (1988), *Mineral processing technology; An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Cuarta edición, Oxford, PergamonPress.
3. Gupta, A. y Yan, D., (2016), *Mineral processing design and operations: An Introduction*. Segunda edición, Inglaterra, Elsevier AppliedSciencePublishers.
4. Gaudin, M., (1939), *Principles of mineral dressing*, Primera edición, U.U.S.S.A.A., McGraw Hill.
5. Richards, R. y Locke, Ch., (1940). *Text book of ore dressing. United States*, McGraw-HILL Book Company.
6. Taggart, A., (1945). *Handbook of mineral dressing ores and industrial minerals*. UnitedStates, McGraw-HILL Book Company.
7. Morán, D., (1984). *Geología de la República Mexicana*, Segunda edición, México, INEGI.
8. Marsden, J. y House, C., (1993). *The chemistry of gold extraction*, Ellis Horwood.

### Libros Digitales

9. Huevo, J., (1996), *Prácticas de laboratorio de la asignatura preparación mecánica de minerales*, [En línea], México, Facultad de Ingeniería, UNAM, disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14209/PRACTICAS%20DE%20LABORATORIO%20DE%20LA%20ASIGNATURA%20PREPARACI%C3%93N%20MEC%C3%81NICA%20DE%20MINERALES-1.pdf?sequence=1> [Accesado el 25 de abril del 2018]
10. Espinosa de León, L. y López, V., (1984), *Teoría y prácticas de trituración y molienda*, [En línea], México, Facultad de Ingeniería, UNAM, disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1660/T>

[EORIA%20Y%20PR%C3%81CTICAS%20DE%20TRITURACION%20Y%20MOLIENDA\\_OCR.pdf?sequence=1](#), [Accesado el 2 de mayo del 2018]

11. Serway, R. y Jewett, J., (2008), *Física para ciencias e ingeniería*, [En línea], Séptima edición, volumen 1, traducido por Víctor Campos, México, Cengage Learning, disponible en: <https://fisica200general1100.files.wordpress.com/2013/09/fc3adsica-para-ciencias-e-ingenierc3ada-serway-jewett-7ma-ed-vol-1-1.pdf>, [Accesado el 8 de marzo del 2018]

#### Páginas de Internet

12. INEGI, (2009), *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Luvianos*, [En línea], *Clave geoestadística 15123*, México, disponible en: [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/15/15123.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15123.pdf), [Accesado el 21 de febrero del 2018]
13. Piñero, D., (2011), *Inventario físico de los recursos minerales de la Carta Bejucos E14-A55*, [En línea], Servicio Geológico Mexicano, México, disponible en: [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/15/15123.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15123.pdf), [Accesado el 30 de enero del 2018]
14. Alarcón, F., (2004), *Inventario físico de los recursos minerales del municipio de Tejupilco, Estado de México*, [En línea], Consejo de Recursos Minerales Fideicomiso del Fomento Minero, México, disponible en: [https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T1504AA\\_LU0001\\_01.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T1504AA_LU0001_01.pdf), [Accesado el 4 de febrero del 2018]
15. Secretaría del Medio Ambiente, (2006), *Diagnóstico ambiental del municipio de Luvianos, Estado de México*, [En línea], Gobierno del Estado de México, disponible en:

[http://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma\\_pdf\\_diag\\_amb\\_luvianos.pdf](http://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma_pdf_diag_amb_luvianos.pdf), [Accesado el 18 de febrero del 2018]

16. H. Ayuntamiento de Luvianos, *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*, [En línea], México, disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15123a.html>, [Accesado el 19 de enero del 2018]

17. Butchart, W., (1914), *Concentrator*, United States Patent Office, [En línea], U.U.S.S.A.A., disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/86/df/9b/b1715f5e8165e8/US1111992.pdf>, [Accesado el 3 de marzo del 2018]

#### Tesis

18. González, N., (2007), *Evolución del centro silíceo de la Sierra de Nanchititla, Estado de México y Michoacán*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Tierra, México, Universidad Nacional Autónoma de México.

19. Souto, A., (2005), *Estudio metalúrgico por el método de concentración gravimétrica para un mineral aurífero de minas de Puerto del Oro, Municipio de Coyuca de Catalán, Guerrero*. Tesis para obtener el título de Ingeniero de minas y metalurgista, México, Universidad Nacional Autónoma de México.