

**LA CONCENTRACION CENTRIFUGA, UNA ALTERNATIVA PARA
RECUPERAR ORO FINO A PARTIR DE RESIDUOS GRAVIMETRICOS Y
SU RELACION CON LA MITIGACION AMBIENTAL**

Armando Álvarez Quispe

Profesor Investigador del Instituto de Investigaciones en
Metalurgia y Materiales -Facultad de Ingeniería -
Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)
e-mail: armando-1781@hotmail.com
Tel./Fax 591 - 2 - 2210402
Bolivia

RESUMEN

En el departamento de La Paz, una de las principales actividades mineras corresponde a la explotación de yacimientos auríferos, labor realizada generalmente por la Minería Pequeña. Este sector, debido a la aplicación de procedimientos rudimentarios con escasa instalación de maquinarias y uso de procedimientos poco adecuados, en muchos casos vulnerando la ley de Medio Ambiente, descarta residuos con alto contenido de oro, que repercute negativamente en su actividad.

En el presente trabajo se analiza la aplicación de la tecnología de centrifugación para recuperar oro en granulometría fina a partir de residuos gravimétricos, tecnología considerada como limpia, que reduce significativamente el uso de mercurio y mitiga la contaminación ambiental.

Para constatar esto, se realizan trabajos experimentales a escala de laboratorio utilizando la muestra proveniente de la Cooperativa Aurífera "Virgen del Rosario" Ltda., situada al norte del Departamento de La Paz.

Los resultados obtenidos demostraron la aplicabilidad de esta tecnología en la solución de los problemas citados y su implementación permitirá mejorar la recuperación de oro en beneficio directo del sector.

ANTECEDENTES

La aplicación de fuerzas centrifugas en procesos industriales data desde hace muchos años atrás, sin embargo, recién en los últimos años, ha encontrado una real aplicación en los diferentes procesos en la industria.

Uno de ellos corresponde al enriquecimiento de minerales, cuya aplicación fue casi inmediata en la minería grande y mediana, pero no en el sector de la minería pequeña (empresarios pequeños y organizaciones de minería cooperativizada), que es la que predomina en el Departamento de La Paz., pues, este sector alberga a alrededor de 150 cooperativas con mas de 15000 trabajadores con una marcada tendencia a ir aumentando el numero de cooperativas⁽¹⁾.

En la pequeña minería, una modalidad para la recuperación de oro es el uso de mercurio ya sea en circuito abierto (molino trapiche donde se introduce mercurio junto con la carga) o previa preconcentración gravimétrica en mesas vibradoras y/o canaletas seguida de una operación de amalgamación de preconcentrados (circuito cerrado). En ambos procedimientos se constata la pérdida de oro en rangos de tamaño considerados como finos (100 a 10 μm) y ultra finos (10 a 1 μm), de difícil recuperación por procedimientos gravimétricos convencionales, particularmente a partir de minerales refractarios como las piritas auríferas, frecuentes en los yacimientos primarios⁽¹⁾, a ello se suma la pérdida de mercurio en los productos de descarte final (colas) en forma de harina de mercurio contaminando una gran cantidad de material y por ende el medio ambiente.

Una de las alternativas para la recuperación del metal precioso a partir de colas de concentración gravimétrica, particularmente en el sector de la minería cooperativizada, puede ser la utilización de los novedosos equipos centrífugos que aumentan la diferencia de los pesos específicos del material valioso respecto al del estéril, permitiendo así, recuperar valores en rangos de tamaño muy finos (menores a 75 μm).

OBJETIVO

En base al análisis de las variables operacionales del centrifugador Falcon SB-40, se desarrollan pruebas de recuperación de oro a partir de diferentes muestras colas relaves del sector de la pequeña minería, para sugerir un procedimiento que permita recuperar valores de oro fino aplicando una tecnología limpia (sin contaminación por mercurio).

MARCO TEÓRICO

Introducción

La concentración gravimétrica convencional es uno de los procedimientos más simples y la más económica respecto a otros procedimientos de enriquecimiento de minerales; permite recuperar valores en un rango bastante amplio, donde las partículas de mineral son separadas debido a su diferencia de densidad. Cuanto mayor es la diferencia en la densidad de dos minerales componentes de una mena, mayor será la facilidad con que se efectúe la separación. La posibilidad de que dos partículas puedan ser separadas por concentración gravimétrica puede ser cuantificada por el Criterio de Concentrabilidad de Taggart (Q)⁽²⁾ definido por la ecuación:

$$Q = \frac{D_p - D_m}{D_l - D_m}$$

Donde: D_p = Densidad de partículas pesadas

D_l = Densidad de las partículas livianas

D_m = Densidad del medio fluido de separación

i "Q" es mayor a 2.5, entonces la concentración por gravedad es relativamente sencilla. Si el valor de "Q" es menor a 2.5, la eficiencia de separación decrece, y por debajo de 1.25, la separación no es comercialmente posible.

Los procedimientos gravimétricos convencionales permiten recuperar con relativo éxito partículas mayores a $75\mu\text{m}$, sin embargo, cuanto menor es el tamaño de estas, mayor es la importancia que adquieren las fuerzas de viscosidad y fluidez en relación a la densidad; de ahí que la eficiencia en la separación disminuya drásticamente cuando las partículas son más finas, donde la diferencia entre los pesos específicos tiende a minimizarse hasta desaparecer.

Una alternativa para el procesamiento de partículas finas es a través de la sustitución de las fuerzas gravitacionales por fuerzas centrífugas, estas últimas aumentan la diferencia entre los pesos específicos de partículas de tamaño fino a un rango mucho más amplio, propiedad que es aprovechada para la separación sólido - sólido, por los diferentes equipos de centrifugación⁽³⁾.

Concentración centrífuga

Todos los fenómenos y fuerzas que interaccionan en la concentración gravimétrica también actúan en la concentración centrífuga, algunos fenómenos son de mayor importancia que otros. Cuando se desea sedimentar partículas finas, es necesario aumentar la fuerza requerida para vencer la resistencia del fluido, fuerza que es conocida como fuerza centrífuga que obedece a la ecuación⁽⁴⁾:

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

Donde: F_c = Fuerza Centrífuga

m = Masa de la partícula

m' = Masa del fluido desalojado

ω = Velocidad Angular

R = Radio de giro de la partícula

F_R = Fuerza de Resistencia del fluido

v_t = Velocidad tangencial

En la industria mineralúrgica, los equipos que trabajan con el principio de centrifugación se pueden clasificar en tres grandes grupos ⁽⁵⁾, estos son:

1. Centrífugas de lecho sedimentado (centrífuga china)

Adquiere la configuración de un tubo rotatorio instalado en un eje horizontal que gira a altas revoluciones por minuto. Se caracteriza por trabajar en forma discontinua ⁽⁵⁾. La alimentación de la pulpa al interior del rotor (carga) está de 2,5 a 3,5 minutos, en cuyo lapso de tiempo, las partículas más pesadas, como consecuencia de la fuerza centrífuga ejercida sobre ellas, tienden a sedimentarse sobre la pared más rápidamente, respecto a las livianas; el lavado del material sedimentado (descarga) se realiza entre 0,5 a 1 minuto. En la figura 1 se observa la configuración del equipo con los dispositivos de alimentación de pulpa y agua.

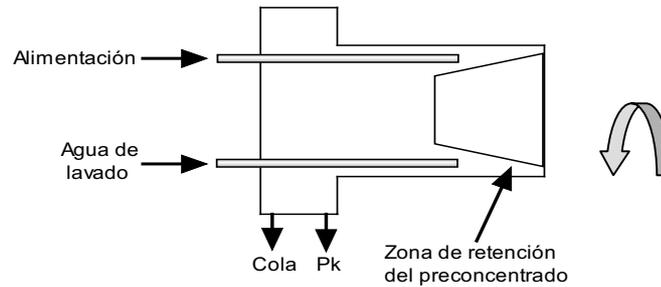


Figura 1 - Esquematización de un Centrífugador Chino, Lou y Lin, 1981

2. Centrífugas de lecho fluidizado (Knelson, Falcon, y otros)

Se caracterizan por trabajar con el movimiento de rotación y el proceso de fluidización en el rotor. La pieza principal de las centrifugas de lecho fluidizado es el tazón o cilindro rotante, donde la geometría del rotor adquiere una configuración distinta de acuerdo a los fabricantes.

En la operación de la centrifuga Knelson (figura 2), el agua se inyecta al rotor mediante una serie de orificios de fluidización, luego se introduce la pulpa a través de un tubo central vertical, la cual, en la base del tazón, debido a la fuerza centrífuga, es forzada a desplazarse por la parte exterior, subiendo por la pared del tazón, donde las partículas pesadas, una vez que se ha alcanzado la fluidización óptima, son atrapadas entre los rifles, creando así un lecho en el que se produce la concentración. Las partículas livianas son descargadas por la parte superior del tazón.

El cilindro rotante de la centrifuga Falcon, internamente, en la parte inferior, adquiere una forma cónica y en la parte superior una

configuración cilíndrica en forma de anillos^(6,9). En su operación, la pulpa es alimentada mediante un tubo central vertical al interior del rotor que gira a altas velocidades. Esta fuerza centrífuga aumenta la diferencia de la gravedad específica y la geometría del rotor facilita la retención de las partículas pesadas en preferencia a las partículas de menor peso específico, que son rechazadas por la parte superior del rotor en forma de rebose conjuntamente el agua del proceso, como se muestra en la figura 3. La inyección de agua a presión entre los rifles del rotor facilita la eficiencia de separación.

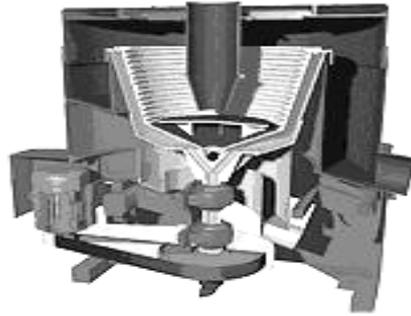


Figura 2 - Centrifuga Knelson

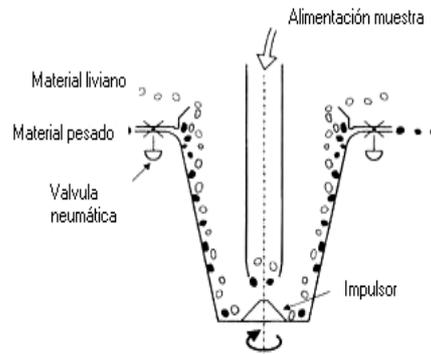


Figura 3 - Separación en la centrifuga Falcon

3. Centrifugas de lecho fluidizado pulsante (Jig Kelsey, concentrador MGS)

Los equipos de este grupo, además de utilizar el movimiento de rotación y agua de fluidización, utilizan un movimiento de pulsación similar al que se observan en los jigs y mesas vibratoras convencionales.

El jig centrífugo Kelsey, concebido a partir del jig Harz instalado en posición horizontal (Figura 4), emplea un mecanismo complicado que hace rotar la criba para generar el campo centrífugo, y un diafragma instalado detrás de la criba, donde ingresa agua a presión, permite el movimiento de la cama pulsante⁽⁷⁾. La alimentación de la pulpa se realiza a través de una tobera vertical central, que luego de llegar a la parte superior de la cama pulsante, por el movimiento de pulsación y la generación de una fuerza centrífuga en el equipo, dá lugar a la formación de dos corrientes de partículas, las livianas y de menor peso específico (que no atraviesan la cama) rebosan por la parte superior de la criba (colas) y la corriente pesada atraviesa la cama pulsante para descargarse como producto concentrado.

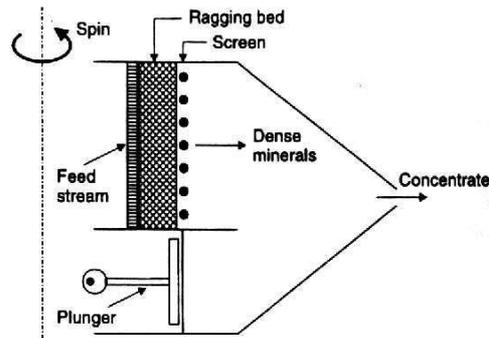


Figura 4 - El jig Kelsey

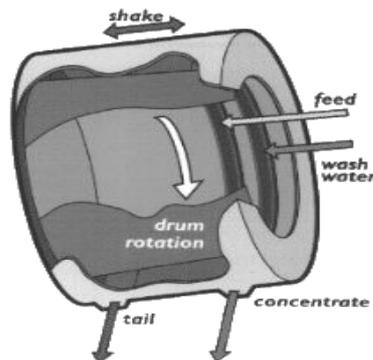


Figura 5 - Separador Multi Gravimétrico (MGS).

El concentrador Multy Gravity Separator (MGS) se asemeja a una mesa vibratoria, en la que la tradicional superficie horizontal se encuentra envuelta en un cilindro cónico. La separación de las partículas pesadas respecto de las livianas se realiza por el efecto de la fuerza centrífuga y el cizallamiento producido por el campo oscilatorio del MGS. Las partículas

pesadas se pegan a las paredes del tambor y luego son transportadas por los raspadores con dirección a la zona de descarga del concentrado y las partículas livianas son arrastradas en contra corriente por el flujo del agua de lavado a un extremo del tambor donde son descargadas⁽⁸⁾.

EXPERIMENTACIÓN METALURGICA

Caracterización de la muestra

Se utilizaron aproximadamente 200 kg de muestra colas relaves de la Cooperativa Minera "Virgen del Rosario" Ltda., ubicada al Norte del Departamento de La Paz. Sus principales características son:

Análisis químico del común = 7.03 g Au/t.

Peso específico real = 2.88 g/cm³

Peso específico aparente = 1.60 g/cm³

El análisis granulométrico muestra que el material original es 100 % menor a 20 mallas (0.850 mm.). El d_{80} de la muestra es 425 micrones. La distribución de valores en rangos de tamaño de partícula mayores a 35 y menores a 150 mallas son aproximadamente similares, observándose variaciones más importantes en rangos de tamaños comprendidos entre -35+150 mallas. Esta característica permite establecer la necesidad de reducir en tamaño la citada muestra a fin de obtener la liberación adecuada de valores de oro.

El estudio mineralógico y grado de liberación de oro, permiten establecer lo siguiente:

- Los principales minerales de la muestra son: Cuarzo, Rocas, Pirita, Arsenopirita y Pirrotina.
- En cantidades pequeñas se observaron: Calcopirita, Esfalerita, Jamesonita, Galena y Carbonatos.
- El oro ha sido clasificado como de grano grueso (30 a 50 micrones) y oro fino (2,5 a 7,5 micrones).
- El oro de grano grueso es observado libre de asociación y sólo asociado con cuarzo, mientras que el oro fino se presente como fina inclusión en arsenopirita y menos frecuente en pirita.
- El oro de grano grueso tiene una liberación del 100 % en las mallas -100+150 y -150 Mallas.
- El oro de grano fino no presenta ningún grado de liberación.

Procedimiento Experimental

Las pruebas se han planificado para analizar el efecto de las variables (factores): Contrapresión de agua (A), Fuerza Centrífuga (B) y Tamaño de Grano (C) en la recuperación de oro en el preconcentrador Falcon SB-40. Para el desarrollo de las pruebas se ha considerado el diseño factorial de 2^3 , es decir, tomando en cuenta 3 factores y dos niveles (máximo y mínimo) ⁽¹⁰⁾. El número de pruebas y las combinaciones se muestran en tabla 1.

Tabla 1 - Algoritmo de Yates

Nº	COMBINACIONES	DISEÑO			(A) presión agua [PSI]	(B) Fuerza centrífuga [G]	(C) Tamaño grano [µm/ MALLA]
		A	B	C			
1	1	-	-	-	2	100	45 / 325
2	A	+	-	-	6	100	45 / 325
3	B	-	+	-	2	300	45 / 325
4	AB	+	+	-	6	300	45 / 325
5	C	-	-	+	2	100	212 / 65
6	AC	+	-	+	6	100	212 / 65
7	BC	-	+	+	2	300	212 / 65
8	ABC	+	+	+	6	300	212 / 65

Cada uno de estos factores varía en dos niveles: "+" (nivel más alto) y "-" (nivel más bajo).

El porcentaje de sólidos y el caudal de alimentación fueron mantenidas constantes en 35 % y 1.325 l/min respectivamente. El resumen de las etapas para cada una de las pruebas es como sigue:

- Molienda de la muestra a 80 % peso paso (al tamaño de corte requerido).
- Preconcentración de la fracción preparada.
- Amalgamación de los productos preconcentrados para recuperar oro físico libre.
- Análisis químico por oro en el preconcentrado (residuo de amalgamación).
- Flotación colectiva de sulfuros a partir de las colas del centrifugador Falcon.
- Amalgamación de producto flotado (Float) para cuantificar el escape de oro físico libre.
- Análisis químico de las colas de amalgamación del producto flotado.

- Balance Metalúrgico.

A los resultados obtenidos en las pruebas preliminares (Tabla 2), se aplicó el análisis de varianza por medio del algoritmo de *Yates* para cuantificar la influencia de los factores en la respuesta, así como la combinación de los mismos. Para este fin se ha desarrollado un programa en *Visual Basic* para obtener directamente la Suma de Cuadrados, dato importante para decidir las nuevas pruebas y definir la variable más influyente en la respuesta.

Tabla 2 - Resultados Preliminares

Nº	A	B	C	y_i
1	-	-	-	84.0
2	+	-	-	78.3
3	-	+	-	92.1
4	+	+	-	68.4
5	-	-	+	39.1
6	+	-	+	60.8
7	-	+	+	68.7
8	+	+	+	60.5

El análisis de varianza correspondiente se muestra en tabla 3.

Tabla 3 - Diseño del ANAVA

PUNTOS DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	VARIANZA	RELACION DE VARIANZA
Efectos Principales				
A	31,60125	1	31,60125	0,192850768
B	94,53125	1	94,53125	0,576889336
C	1097,46125	1	1097,46125	6,697401042
Interacciones				
AB	286,80125	1		
AC	230,05125	1		
BC	120,90125	1		
ABC	17,70125	1		
Suma	655,455	4	163,86375	

El análisis de la influencia de los factores en la respuesta ha dado lugar al diseño de una nueva serie de pruebas que complementa los resultados iniciales y nos lleva a diseñar el modelo matemático, además de definir las variables más influyentes. Los resultados se muestran en Tabla 4.

Tabla 4 - Diseño de Pruebas complementarias

N°	A [PSI]	B [G]	C [μm]	Y _i
1	1	100	45	74.5
2	4	100	45	93.7
3	2	60	45	86.5
4	2	200	45	91.7
5	2	100	38	87.4
6	2	100	150	91.7

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

A. Granulometría de Alimentación

En figura 6 se muestra el resumen del efecto de la granulometría de alimentación sobre la recuperación, gráficos obtenidos a fuerzas centrífugas y presión de agua variables en el proceso de enriquecimiento del mineral en estudio. Este gráfico indica que a medida que disminuye el tamaño de grano, mejora la recuperación, como se observa en cada uno de los casos, percibiéndose una mejor recuperación a 300 G y 2 PSI, y la más baja, en condiciones de 300 G y 6 PSI, estableciéndose la importancia de la contra presión de agua, respecto de la fuerza centrífuga, sin embargo una recuperación igual a la obtenida a 300 G y 2 PSI es alcanzada en otras condiciones de trabajo, 100 G y 2 PSI.

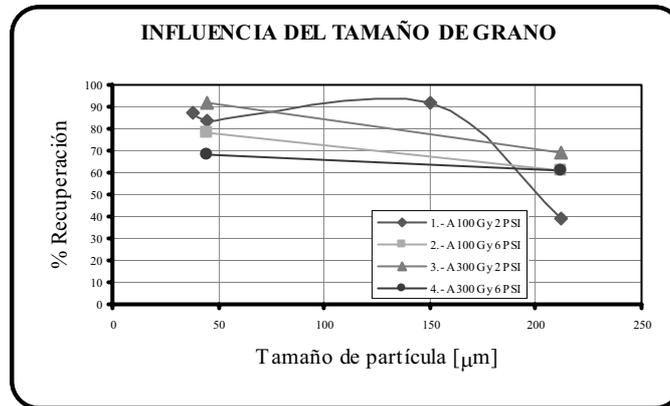


Figura 6 - Efecto del Tamaño de Grano de Alimentación

La curva (1) muestra gráficamente lo innecesario de realizar moliendas muy finas, para obtener buena liberación de los valores de la

muestra y por ende conseguir mejores recuperaciones. Pues como se observa en esta curva, al realizar una molienda a 38 μm sólo conseguimos mejorar levemente la recuperación obtenida a 45 μm .

B. Contrapresión de Agua

El efecto de la presión de agua en el proceso concentración por centrifugación, ilustrado en las curvas y representadas en figura 7, sugieren que el efecto de la misma es en sentido negativo como se observa en las curvas 1, 3 y 4, pues a medida que la presión aumenta la recuperación sufre un descenso no deseado. La curva 2 muestra una variante inusual a esta tendencia, pues, para 100 G de fuerza centrífuga y 212 μm de tamaño de grano, aumenta la recuperación a medida que aumenta la presión de agua, sin embargo la recuperación alcanzada con dicho tamaño de grano no es suficiente.

No obstante a estas primeras inferencias, las pruebas complementarias consignadas en curva 1, indican que existe un rango en la variación de la presión para el cual se obtienen recuperaciones óptimas.

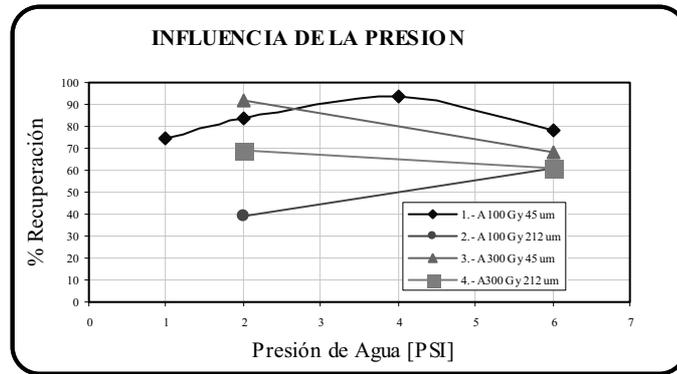


Figura 7 - Efecto de la Contra presión de agua

C. Fuerza Centrífuga

El efecto de la fuerza centrífuga aplicada al proceso de concentración centrífuga, en teoría debería de ser la variable más influyente sobre dicho proceso, sin embargo, las pendientes obtenidas en las curvas de figura 8, plantean lo contrario, ya que en la mayoría de los casos se observan rectas con pendientes con relativa inclinación, a excepción de la recta 3, para 2 PSI y 212 μm , que describe un incremento sustancial en la recuperación a medida que aumenta la fuerza centrífuga.

Las pruebas complementarias confirman que la fuerza centrífuga no genera un cambio sustancial en la recuperación, particularmente en el rango de 200 a 300 G, en la concentración por centrifugación.

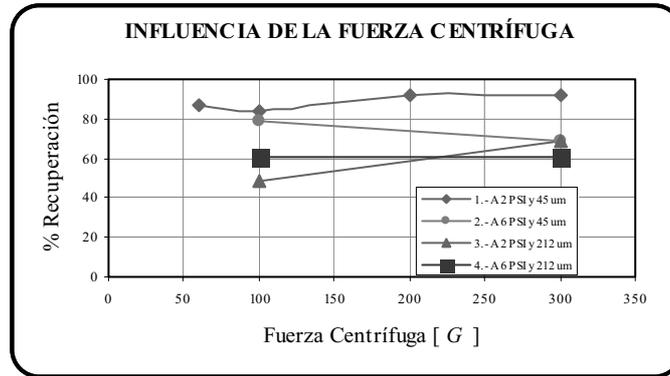


Figura 8 - Efecto de la Fuerza Centrífuga

1) Modelación Matemática

Por las observaciones remarcadas en la evaluación de las variables, para obtener la matriz de coeficientes de la ecuación matemática que rige el proceso de concentración por centrifugación, se utilizan aquellos resultados donde la fuerza centrífuga permanece constante, igual a 100 G. Un resumen de los datos utilizados en la modelación matemática se presenta en tabla 5:

Tabla 5 - Datos para la modelación

Nº	Presión x_1	Tamaño de Grano x_2	Fuerza Centrífuga	Y_i
1	1	45	100	74.5
2	2	45	100	84.0
3	4	45	100	93.7
4	6	45	100	78.3
5	2	212	100	39.1
6	2	150	100	91.7
7	2	38	100	87.4
8	6	212	100	60.8

La ecuación propuesta para la modelación es la siguiente:

$$Y=114,73+3,46x_1-11,27x_1^2-17,29x_2-36,11x_2^2+7,28x_1x_2$$

2) Procesamiento de otras muestras

En tabla 6 se consignan los resultados obtenidos en el procesamiento de diferentes muestras de residuos de plantas de concentración gravimétrica del sector de la Minería Pequeña Cooperativizada. En la figura 9 se propone el diagrama de flujo correspondiente para el tratamiento de las mencionadas cargas auríferas.

Tabla 6 - Resultados obtenidos con varias muestras de colas relaves

Presión de Agua [lb/pulg ²]	Fuerza Centrifuga (G)	Molienda 100 % menor a:	Ley Cabeza Au [g/t]	% Recua.	Características de la muestra	Cooperativa
2	300	-212 [um]	12,00	93,06	Muy poca pirita	San Vicente - Prov. Larecaja
3	300	-75 [um]	46,00	76,05	Piritas auríferas	Kantuta - Prov. Nor Yugas
4	200	-75 [um]	39,40	67,30	Piritas auríferas	Cotapata - Prov. Nor Yugas
2	200	-150 [um]	6,10	86,33	Muy poca pirita	Rayo Rojo - Prov. Franz Tamayo

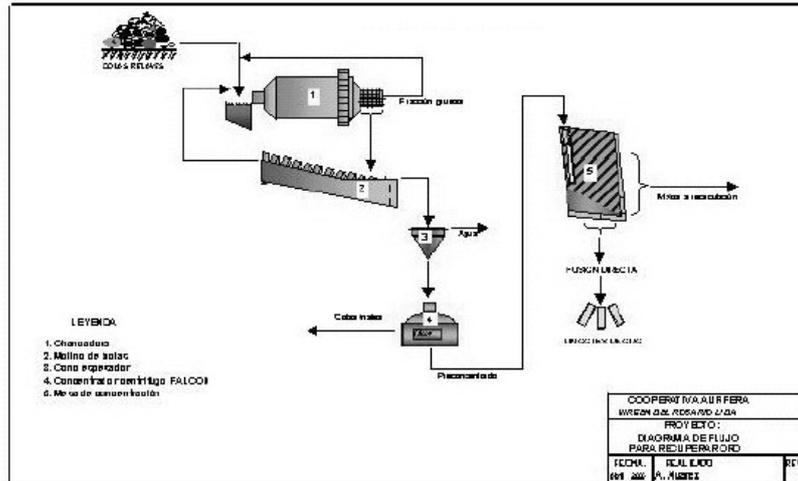


Figura 9 – Flujograma para el procesamiento de oro proveniente de relaves antiguos

CONCLUSIONES

De la experimentación metalúrgica a escala laboratorio con la muestra colas relaves de la Cooperativa "Virgen del Rosario" Ltda., se concluye lo siguiente:

- Las variables más influyentes en el trabajo de la centrífuga Falcon SB-40 son el tamaño de alimentación y la presión de agua de fluidización, ya que por sí mismas generan importantes cambios en la variable respuesta.
- La variables fuerza centrífuga resulta ser de menor influencia, especialmente si se mantiene en el rango de 200 a 300 G, aunque resulta ser significativa en combinación con la contrapresión de agua.
- Cuando la carga se reduce a 80 % - 325 mallas, se alcanza muy buena liberación de valores, y en estas granulometrías se logran las máximas recuperaciones (90 a 93 %), trabajando entre 2 a 4 PSI de presión de agua y 200 a 300 G's de fuerza centrífuga.
- El uso del centrífugo Falcon como preconcentrador de cargas auríferas y mesas vibrantes lameras o mesas Gemini instaladas para la limpieza de preconcentrados pueden permitir recuperaciones de oro elevadas respecto al total del metal precioso alimentado al proceso.

- La concentración centrífuga, por ser considerada como una tecnología que no contamina el medio ambiente, constituye una alternativa real para el procesamiento de pasivos ambientales donde los valores se encuentran en granulometría fina.
- Los resultados obtenidos con varias muestras de colas relaves, del sector de la minería cooperativizada, muestran que pueden ser reprocesados aplicando procedimientos nuevos cuyos flujogramas utilicen equipos centrifugadores que permiten recuperar valores en el rango de tamaños muy finos.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Hinojosa D. Jaime, Diagnostico socio económico de la minería aurífera primaria en la Provincia Larecaja: Sector Yani Liguata, Departamento de La Paz, 1996, MEDMIN – COTESU, La Paz – Bolivia.
- 2) Taggart, Arthur F., Elementos de Preparación de Minerales, Ediciones Interciencia, 1968, Madrid.
- 3) Cliffoord D., Concentración Gravimétrica, Mining Journal – Edición en español, Septiembre, 1999.
- 4) Casseres Carrisso Regina Coeli, Pinto Chaves Arthur, Mecanismos Actuantes na Concentração Gravítica e Principais Equipamentos Utilizados na Concentração Centrífuga, Série Tecnologia Mineral.
- 5) Hinojosa O., Salas A. Concentración centrífuga de menas estanníferas, III Congreso Nacional de Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Oruro – Bolivia, 1998.
- 6) FALCON CONCENTRATORS INC, Manual de Operación del Centrifugador Falcon Modelo SB40.
- 7) Mozley Multi-Gravity Separator Systems, Richard Mozley Limited
- 8) Roche MT Workshop 2002-Gold Coast, A new world of mineral processing solutions, Roche Mining, a Division of Downer edit Limited, Mineral Technologies.
- 9) Fedotov K. V., Beloborodov V. I., Leonov S. B. and Iestra K. H., Recovery of fine gold using efficient gravity separators, Proceedings of the IMPC, Aachen, 21 – 26 September 1997.
- 10) Montealegre J. Raúl, Diseño Experimental con Aplicaciones a la Metalurgia Extractiva, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico OEA, Proyecto Multinacional en Concentración de Minerales.