

RECUPERACION DE ORO A PARTIR DE PIRITAS AURIFERAS

Armando Alvarez Q.

Ingeniero Metalurgista; Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales - UMSA,
armando_1781@hotmail.com.

Luis Cervando Chambi V.

Ingeniero Metalurgista; Instituto de Investigaciones en Metalurgia y materiales - UMSA, vando_vch@yahoo.es.

Germán Núñez A.

Ingeniero Geólogo; Instituto de Geología y Medio Ambiente - UMSA, gernuara@mixmail.com

RESUMEN

Algunas Cooperativas Auríferas del Departamento de La Paz, en la etapa de procesamiento de minerales provenientes de yacimientos primarios, obtienen residuos con alto contenido de sulfuros (piritas auríferas). Por la forma de trabajo de estas, el oro contenido en las piritas generalmente no son recuperadas.

En el presente estudio referente a “La recuperación de oro a partir de piritas auríferas” se analiza la aplicación de la gravimetría centrífuga considerada como “Tecnología Limpia” para recuperar oro físico a partir de estos materiales, que hoy por hoy no se procesan en el sector de las Cooperativas Mineras Auríferas.

Para el estudio se han seleccionado a tres Cooperativas Mineras, estas son: Cotapata Ltda., Yani Ltda., y Rayo Rojo Ltda., cuyos residuos de procesamiento gravimétrico mayoritariamente compuesto por sulfuros fueron sometidas a molienda a 80 % - 200 mallas para generar una liberación adecuada de oro, seguida de una operación de preconcentración en centrífuga Falcon SB-40 y limpieza mediante el procedimiento convencional gravimétrico.

Los resultados obtenidos en oro físico, a partir de las muestras sometidas a las pruebas de recuperación son:

Cooperativa Aurífera	% Recuperación (Au Físico)
Cotapata Ltda.	63,27
Yani Ltda.	30,94
Rayo Rojo Ltda.	68,99

Estos resultados permiten establecer, que utilizando el procedimiento considerado como tecnología limpia (gravimetría centrífuga), se puede recuperar oro físico libre, en consecuencia esta metodología de procesamiento es posible implementarlo en el sector de las Cooperativas Auríferas con la finalidad, no

solo de recuperar oro a partir de piritas auríferas, sino también para recuperar oro en granulometría muy fina a partir de los relaves de ingenio.

En base a los resultados obtenidos, se sugiere un diagrama de flujo del proceso para la instalación de una Planta Piloto Semi Industrial.

1. ANTECEDENTES

La baja en la cotización del estaño en el mercado internacional (1985), redujo sustancialmente la actividad Minero Metalúrgica Estatal, lo que originó una creciente desocupación en el país entre los años 1985 a 2000. Como consecuencia, muchos trabajadores mineros despedidos de las empresas estatales, se incorporaron a la actividad minera en el Departamento de La Paz, formando parte de las Asociaciones Cooperativizadas, centrando sus actividades principalmente en la explotación de oro que tiene una alta cotización en el mercado internacional, lo que hace atractiva su explotación. Sin embargo, este sector no ha merecido una atención técnica adecuada de las entidades gubernamentales, el apoyo técnico se redujo a casos aislados como el trabajo realizado por el Programa MEDMIN de la Cooperación Suiza, en consecuencia, la información relacionada a aspectos técnicos en el sector es reducida.

En la encuesta técnica realizado por el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales (IIMETMAT) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), en el norte del Departamento de La Paz en el año 2005, se establece que las cooperativas desarrollan sus actividades utilizando tecnologías rudimentarias, en pocos casos con escasa mecanización, donde, para la recuperación de oro a partir de minerales de yacimientos primarios, utilizan el proceso de concentración gravimétrica (jigs, mesas vibratorias y canaletas) y amalgamación con mercurio, ya sea en la etapa de molienda (se introduce mercurio al interior del molino) o amalgamación de preconcentrados (Ejemplo: Cooperativa Au. “Cotapata Ltda.”, Fotografías 1 y 2.).



Fotografía 1. Campamento de la Coop. Cotapata Ltda. Parte baja del cañadón: Ingenio de la Cooperativa.



Fotografía 2. Vista interior del ingenio de la Cooperativa. Área de amalgamación de preconcentrados, con mercurio.

En esta modalidad de trabajo, uno de los productos de mayor importancia económica corresponde a los residuos de amalgamación (piritas auríferas) cuyas leyes oscilan entre 30 a 50 g Au/t, que ante la imposibilidad de su procesamiento insitu, este material es comercializado a instituciones del exterior del país a un precio muy irrisorio (50 a 200 \$us/t.). La forma de beneficio de menas de oro en el sector de la minería cooperativizada repercute directamente en:

- **Baja recuperación de oro.** Parte del oro se pierde junto a las piritas auríferas, material refractario, donde el oro libre en tamaño muy fino, no es amalgamado por el mercurio, por lo que la recuperación en el proceso no es mayor al 50 %.
- **Contaminación ambiental por uso de mercurio e iones pesados.** Los relaves de esta operación, que tienen contenido de mercurio fino “harina de mercurio” se descartan al medio ambiente, junto a las piritas auríferas, dando

lugar al Drenaje Acido de Roca (DAR) que descompone los metales pesados en el tiempo y que luego van a parar al lecho de los ríos.

Los procedimientos convencionales de recuperación de oro utilizados en las cooperativas no permiten recuperar oro en rangos de tamaño extremadamente finos (100 a 10 micrones) particularmente a partir de piritas auríferas, frecuentes en los yacimientos primarios ⁽³⁾. Una metodología convencional para procesar piritas auríferas, aplicada en empresas con alta tecnología, es la cianuración de oro donde el cuidado del medio ambiente es una prioridad, procedimiento que no se aplica en la minería cooperativizada por factores atribuibles al manipuleo del cianuro, desconocimiento del método y otros.

Una alternativa, para una optima recuperación de oro libre en rangos de tamaño muy fino a ultra fino, sin uso de mercurio, es la concentración centrífuga ^(1,3), procedimiento que aumenta la fuerza de gravedad haciendo que la separación se realice a un valor de varias veces la gravedad por lo que los equipos que usan este principio son más eficaces respecto a los convencionales ^(4,5). Sin embargo, esta tecnología no se emplea en el sector de las Cooperativas Auríferas, principalmente por el desconocimiento de las características de liberación de las menas auríferas ligado al control de operación en los circuitos que involucren a los equipos centrífugos.

Con la finalidad de buscar una alternativa de procesamiento de piritas auríferas para recuperar su contenido de oro, el IIMETMAT realizo varios trabajos de investigación, de ellos, uno de los más notorios fue el que se logró aplicando fuerzas centrífugas producidas por los equipos de concentración centrífuga, conocida como “Tecnología Limpia”, cuyos resultados se reportaron en el artículo **“Alternativas de procesamiento de piritas auríferas para la disminución de impactos ambientales”⁽⁷⁾**.

En este mismo marco, a través de la “Convocatoria a proyectos de innovación productiva y tecnológica”, se ha recibido, del Programa de Investigación Estratégica en Bolivia (PIEB), financiamiento para ejecutar el proyecto **“RECUPERACION DE ORO A PARTIR DE MATERIALES REFRACTARIOS (PIRITAS AURIFERAS)”**.

2. OBJETIVO

Analiza el aprovechamiento integral de las piritas auríferas para recuperar su contenido de oro, trabajo que involucra la evaluación técnica para la instalación y puesta en marcha de una Planta Piloto Semi Industrial

para el tratamiento, con tecnología limpia, de piritas auríferas provenientes de distintas Cooperativas Auríferas del Departamento de La Paz.

3. FUNDAMENTOS TEORICOS

Según Des Clifford⁽¹⁾, la concentración por gravimetría es simple y económica respecto de todos los métodos de concentración de minerales y permite la recuperación de valores en un rango de tamaño amplio, desde 500 mm hasta los más finos como 5 micrones, donde las partículas sólidas son separadas según su diferencia de densidad. En este método, la eficiencia de separación se determina mediante la ecuación propuesta por H.F. Taggart⁽²⁾, denominada como “**Criterio de Concentrabilidad**”, ecuación que proporciona una información valiosa del grado de concentrabilidad de un material mineralizado en campos de fuerza gravitacionales; esta ecuación es:

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

Donde: D_p = Densidad de partículas pesadas
 D_l = Densidad de partículas livianas
 D_m = Densidad del medio fluido de separación

Si “Q” es mayor a 2,50 la concentración por gravedad es sencilla, para “Q” menor a 2,50 la eficiencia de separación decrece y por debajo de 1,25 la separación no es comercialmente posible.

El movimiento de las partículas en un fluido depende de su gravedad específica y del tamaño de partícula. La velocidad de asentamiento de las partículas en agua, para pequeñas esferas, obedece a la ecuación de Stokes⁽²⁾.

$$V_m = \frac{d^2 g (P_s - P_l)}{18\mu}$$

Donde: V_m = Velocidad de sedimentación terminal
 P_s = Densidad del sólido
 P_l = Densidad del líquido
 D = Diámetro de la partícula
 G = Aceleración debida a la gravedad
 μ = Viscosidad del fluido

La ecuación muestra que cuanto menor es el tamaño de las partículas, mayor es la importancia de las fuerzas de viscosidad y fluidez en relación a la densidad; de ahí que la eficiencia de separación disminuya drásticamente cuando las partículas son más finas⁽³⁾. Ante la necesidad de contar con una

tecnología que permita la recuperación de partículas cada vez más finas, durante las dos últimas décadas, se han sustituido las fuerzas gravitacionales por fuerzas centrífugas, las que aumentan la diferencia de densidad de partículas de tamaño fino a un rango mucho más amplio, propiedad que es aprovechada para la separación sólido-sólido, por los equipos de centrifugación^(1,5). Para 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⁽⁶⁾:

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

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

4. EXPERIMENTACIÓN METALURGICA

4.1. TOMA Y PREPARACION DE MUESTRAS

Para el desarrollo del estudio en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Universidad Mayor de San Andrés, las muestras fueron tomadas en las Plantas de Procesamiento de las Cooperativas Mineras Auríferas “Cotapata Ltda.”, “Yani Ltda.” y “Rayo Rojo Ltda.”, ubicadas en los cantones de Cota Pata (Subregión Sud Yungas), yani (Subregión Yani-Liguata) y Pelechuco (Subregión Suches) respectivamente, al norte del Departamento de La Paz.

Cada una de las muestras fueron homogeneizadas y por cuarteos sucesivos se han obtenido porciones específicas para el análisis químico, análisis granulométrico, determinación de peso específico real y aparente, pruebas de molienda, análisis mineralógico y para el desarrollo de las pruebas de concentración por gravimetría centrífuga para establecer los parámetros operacionales del proceso antes mencionado y tomar estos, como punto de referencia para el diseño final del circuito y la construcción de la planta piloto semi industrial. El resumen de las etapas que comprende el desarrollo de la fase experimental es como sigue:

- ❖ Clasificación de la muestra con corte en el rango de tamaño analizado (80% -200 Mallas)

- ❖ Molienda de la fracción mayor al tamaño de corte hasta que el 80 % pase por malla 200.
- ❖ Preconcentración de la fracción preparada, con repaso de colas, a fin de obtener tres preconcentrados.
- ❖ Separación de oro físico libre, a partir de los productos preconcentrados, mediante lavado cuidadoso en chua (Simula el trabajo de una mesa Gemini).
- ❖ Análisis químico de las colas Falcon y chua.
- ❖ Balances metalúrgicos.

4.2. CENTRIFUGA UTILIZADA EN LA PRECONCENTRACION

En el desarrollo de las pruebas experimentales a escala de laboratorio, en la etapa de preconcentración de minerales, se ha utilizado la centrifuga Falcon Sb-40 (Fotografía 3), equipo que constituye el corazón del proceso por que en su operación, para partículas en granulometría muy fina, permite aumentar la diferencia de densidad.



Fotografía 3: Centrifuga Falcon SB-40

La centrifuga Falcon está compuesta por un cilindro rotante donde la geometría del rotor, internamente, en la parte inferior adquiere una forma cónica y en la superior una configuración cilíndrica en forma de anillos⁽⁶⁾. En su operación, la pulpa (20 a 50% sólidos) es alimentada mediante un tubo central vertical al interior del rotor que gira a altas r.p.m. para impartir hasta 300 "Gs" (300 veces la gravedad) al material que se está procesando.

La fuerza centrifuga aumenta la diferencia de la gravedad específica y la geometría del rotor facilita la retención de las partículas pesadas en preferencia a las de menor peso específico, que son rechazadas por

la parte superior del rotor (rebose), conjuntamente el agua del proceso (figura 1). Para facilitar la eficiencia de separación se inyecta agua a contrapresión entre los rifles en la parte superior del rotor, agua de fluidización que permitir el lavado de las partículas pesadas que migraron a la zona de retención del concentrado.

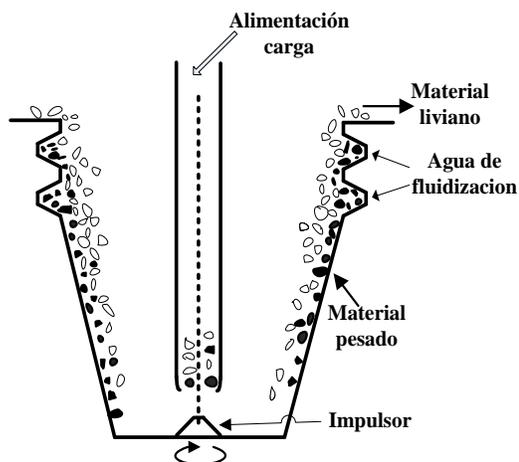


Figura 1. Principio de separación de la centrifuga Falcon SB 40.

5. RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS QUÍMICO DEL COMUN CABEZA

El común cabeza de las tres muestras analizadas en el laboratorio químico del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales de la UMSA, es como sigue:

MUESTRA (Coop.)	Cotapata Ltda.	Yani Ltda.	Rayo Rojo Ltda.
ORO (g/t)	45,38	55,00	28,00

5.2. PESO ESPECÍFICO

Los pesos específicos del común de la muestra, cuantificados por duplicado mediante el método del picnómetro, son:

MUESTRA (Coop.)	Cotapata Ltda.	Yani Ltda.	Rayo Rojo Ltda.
Peso Esp. real (g/cc)	4,02	4,12	3,06
Peso Esp. Ap. (g/cc)	2,61	2,22	1,72

5.3. ANALISIS GRANULOMETRICO

El análisis de la distribución granulométrica en el común original de la muestra de la Cooperativa Minera "Cotapata Ltda.", fue efectuado por isometría utilizando tamices de la serie Tyler. Los resultados se esquematizan en la figura 2.

En la grafica se observa que el 100 % de la muestra se encuentra en granulometría menor a 20 mallas de

la Serie Tyler (0,833 mm.), de la cual, aproximadamente el 80 % está en rangos de tamaño menores a 590 micrones (- 28 Mallas de la serie Tyler) y solo una pequeña proporción de ella está en fracciones menores a 270 Mallas (menor a 53 micrones).

El d_{80} del material sometido a estudio es 424 micrones.

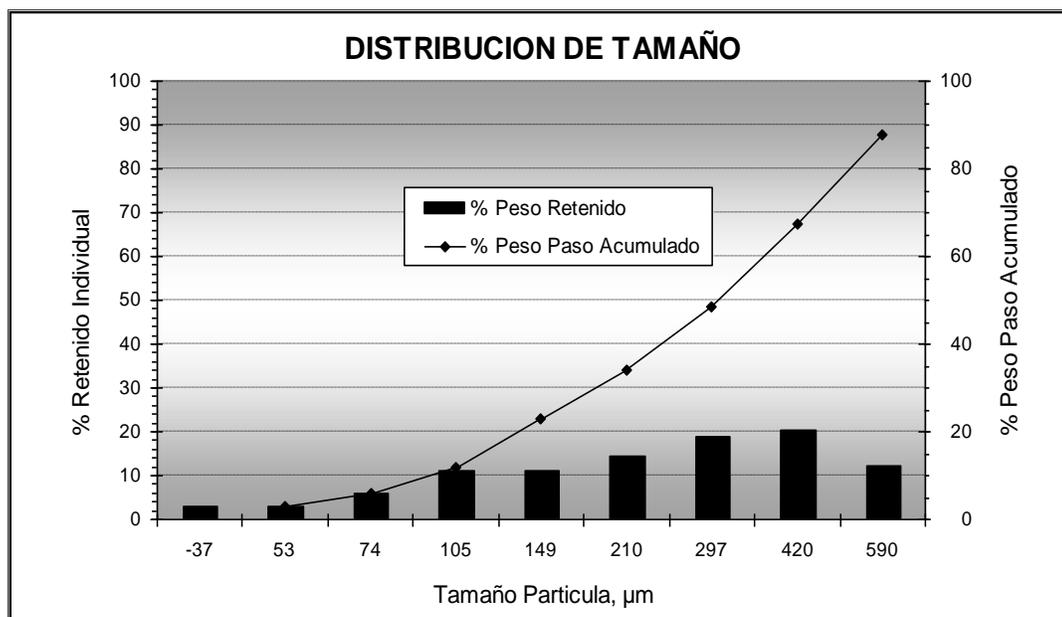


Figura 2: Tamaño de partícula Vs. Porcentaje peso paso acumulado

5.4. ANÁLISIS MINERALÓGICO Y GRADO DE LIBERACIÓN.

El análisis mineralógico del común cabeza de la muestra de la Cooperativa "Cotapata Ltda.", fue realizado en el Instituto de Investigaciones Geológicas y Medio Ambiente (IGEMA) de la UMSA, en las fracciones +48, +65, +100, +150 y -150 mallas de la serie Tyler. Los resultados indican que las colas piritas están constituidas por cuarzo, piritas, arsenopiritas y rocas como componentes mayoritarios. Los aspectos más relevantes del informe Mineralógico y Grado de liberación proporcionado por IGEMA son:

- ❖ Los principales minerales de la muestra son: Piritas, Arsenopiritas, Pirrotina y rocas.
- ❖ En cantidades pequeñas se observaron calcopiritas, esfalerita y carbonatos, todas en fracciones menores a 65 mallas.

- ❖ El oro ha sido clasificado como oro grueso mayores a 50 micrones y oro fino menores a este tamaño, hasta 7.5 micrones.
- ❖ El oro de grano grueso es observado libre asociado mayoritariamente a piritas, mientras que el oro fino está presente como finísimas inclusiones en la piritas y menos frecuentemente en la arsenopiritas.
- ❖ El oro de grano grueso tiene una liberación en los rangos de + 100 y -150 mallas como se muestra en tabla 1.

5.5. PRUEBAS DE CONCENTRACION GRAVIMETRICA CENTRIFUGA

Debido al carácter diseminado e irregular que presenta el oro en las piritas auríferas, con la finalidad de generar la máxima liberación de oro, para el desarrollo de todas las pruebas a escala de laboratorio, las muestras fueron molidas a 80 % -200 mallas de la Serie Tyler.

Las pruebas de concentración centrífuga se realizaron en la Centrifuga Falcon SB – 40 de laboratorio, cuyas condiciones de operación, establecidas en trabajos de investigación

anteriores^(6,7), fueron: 5 PSI de presión de agua de fluidización, 30 % sólidos, 300 “Gs” de fuerza centrífuga y 18 Kg/Hr de caudal de alimentación.

Tabla 1: Componentes Mineralógicos y Porcentajes en Peso (Fuente IGEMA)

MINERALES	+48M	+65M	+100M	+150M	-150M
Piritas	72.81	63.51	80.74	71.43	68.44
Rocas	7.85	13.06	6.54	10.18	10.34
Cuarzo	10.95	20.76	6.87	12.87	18.27
Calcopirita	1.50	0.38	0.38	-	-
Arsenopirita	6.00	-	4.84	2.55	1.13
Esfalerita	0.89	2.29	0.19	2.97	-
Oro	*	*	0.44	*	1.82
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

* Valores no estimados en el porcentaje

La obtención de oro físico de cada uno de los productos preconcentrados Falcon, se ha realizado mediante lavado gravimétrico cuidadoso en chua simulando el trabajo que realiza una mesa Gemini, en vista de que no se disponía este equipo en la fecha de realización de las pruebas.

La mesa Gemini, con el que se realizó la limpieza de preconcentrados en los anteriores trabajos de investigación, fue alquilada solo para el desarrollo de aquellas pruebas. Los resultados bajo estas condiciones de trabajo son:

5.5.1. COOPERATIVA COTAPATA LTDA.

En tabla 2 se consigna el resumen de los resultados logrados siguiendo el procedimiento anteriormente mencionado.

5.5.2. COOPERATIVA YANI LTDA.

En la tabla 3 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en el procesamiento de la muestra de la Cooperativa Minera “Yani Ltda.”, utilizando la centrifuga Falcon SB-40.

Tabla 2: Balance Metalúrgico Resumido – Cooperativa Aurífera “Cotapata Ltda.”

PRODUCTO	% PESO TOTAL	Au (g/t)	% DISTRIBUCIÓN Au
Au Físico 1	0,0025	0,099*	57,75
Au Físico 2	0,0002	0,007*	4,07
Au Físico 3	0,0001	0,003*	1,45
Total Au Físico	0,0027	0,109*	63,27
Mixtos 1	6,78	32,62	5,12
Mixtos 2	6,59	21,00	3,20
Mixtos 3	5,01	18,05	2,09
Total Mixtos	18,38	24,49	10,41
Cola Final	81,62	13,95	26,32
Cabeza Cal.	100,00	43,25	100,00
Cabeza Ens.		45,38	

(*) Expresado como oro físico

Tabla 3: Balance metalúrgico resumido – Cooperativa Aurífera “Yani” Ltda.

PRODUCTO	% PESO TOTAL	Au (g/t)	% DISTRIBUCIÓN Au
Au Físico 1	0,0012	0,046*	29,27
Au Físico 2	0,0001	0,002*	1,43
Au Físico 3	0,0001	0,002*	1,24
Total Au Físico	0,0013	0,050*	30,94
Mixtos 1	6,58	91,33	14,47
Mixtos 2	6,22	35,00	5,24
Mixtos 3	5,96	26,00	3,73
Total Mixtos	18,76	51,90	23,44
Cola Final	81,24	23,33	45,62
Cabeza Calculada	100,00	41,54	100,00
Cabeza Ensayada		55,00	

(*) Expresado como oro físico

5.5.3. COOPERATIVA RAYO ROJO LTDA.

La muestra de los residuos relaves con alto contenido de sulfuros auríferos de la Cooperativa “Rayo Rojo Ltda.”, fueron también preparadas siguiendo la misma

metodología aplicada para las muestras de las dos cooperativas anteriormente mencionadas. El resumen de los resultados obtenidos en la etapa experimental se muestra en Tabla 4.

Tabla 4: Balance Metalúrgico Resumido – Cooperativa Aurífera “Rayo Rojo Ltda.”

PRODUCTO	% PESO TOTAL	Au (g/t)	% Distribución Au.
Oro Físico	0,0018	0,067*	65,95
Mixto	3,55	24,00	3,05
Preconcentrado Falcon	3,56	543,10	68,99
Cola Falcon	96,44	9,00	31,01
Cabeza Calculada	100,00	28,00	100,00

(*) Expresado como oro físico

6. DISCUSION DE RESULTADOS

Como se observa en tabla 2, la separación centrífuga en el equipo Falcón SB-40, permite un enriquecimiento pronunciado de oro en el producto preconcentrado, en el que se constata una elevada cantidad de oro físico libre en granulometría muy fina como consecuencia del grado de molienda aplicado para conseguir la liberación de oro.

La Figura 3 muestra la relación de la ley del preconcentrado obtenido, respecto a la recuperación, en cada paso en la centrífuga Falcon.

En esa figura se observa que en el primer paso se logra obtener un producto preconcentrado con tenor de 400, 62 g Au/t con distribución de 62,87 % de oro respecto al total contenido en la alimentación, donde

el preconcentrado alcanza a tan solo el 6,70 %, respecto a la muestra original. Estos altos índices metalúrgicos obtenidos en el primer paso Falcon, hace muy atractiva la aplicación de esta metodología en el procesamiento de la piritas aurífera de la Cooperativa Minera “Cotapata Ltda.”

En los restantes dos pasos se incrementa la recuperación de oro muy levemente, sin embargo la cantidad de preconcentrado aumenta a un valor de 18,39 % respecto al total de la muestra con ley promedio de 173,35 g Au/t.

La recuperación de oro físico a partir de cada uno de los productos preconcentrados muestra una tendencia similar, es decir, a partir del primer preconcentrado se obtiene oro físico con una recuperación de 57,75 % respecto al total de oro

contenido en alimentación y en los restantes dos pasos la recuperación adicional de oro alcanza a 5,52 %. La recuperación total en oro físico es de 63,27 %, este porcentaje ha sido obtenido de un producto preconcentrado de 18,38 %, quedando como residuo de esta operación un producto mixto con tenor de 24,49 g Au/t., susceptible de ser procesado por otra vía.

Los resultados de la tabla 3, obtenidas a partir de la muestra de la Cooperativas Minarez “Yani Ltda”, muestran un comportamiento similar al que fue obtenido con la carga piritas de la Cooperativa

“Cotapata Ltda.”, lo que implica que en el primer paso Falcon se obtiene un producto con la mayor cantidad de oro físico libre (269,10 g Au/t).

Los pasos subsiguientes permiten incrementar la recuperación de oro, sin embargo, el tenor de estos, es significativamente menor respecto al primer paso. En total, en la etapa de preconcentración la distribución de oro alcanza a 54,37 % respecto a la alimentación y de ese producto, en la etapa de limpieza, con el mismo procedimiento aplicado para la Cooperativa “Cota Pata Ltda.”, se recupera el 30,94 % como oro físico libre.

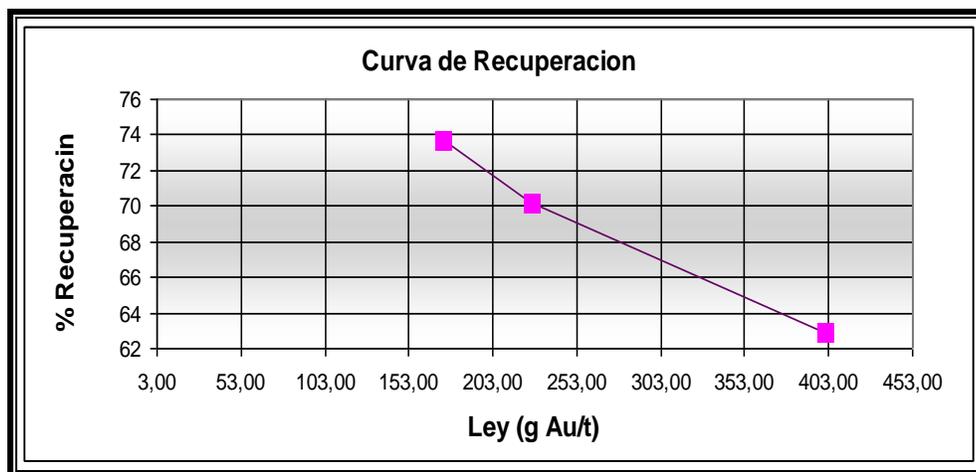


Figura 3: Recuperación de oro en los productos preconcentrados de centrifuga Falcon SB-40.

Por otra parte, durante el trabajo experimental seguido con esta muestra, se ha constatado la presencia de Schelita, mineral de wólfam que tiene un peso específico mayor al de la pirita, mineral que también es atrapado por los rifles del rotor de la centrifuga Falcon, que probablemente haya contribuido negativamente para una menor recuperación de oro físico libre.

El balance metalúrgico de la tabla 4, correspondiente a la Cooperativa “Rayo Rojo Ltda.” muestra una alta recuperación en un solo paso comparado con los balances metalúrgicos que corresponden a las muestras de las otras dos cooperativas anteriormente mencionadas.

Esta diferencia se atribuye al hecho de que la muestra original (residuos de amalgamación) tenía un contenido de oro en grano relativamente grueso (Aproximadamente 0.6 a 0.3 mm.), debido a una inadecuada reducción de tamaño que se practica en la planta de la cooperativa “Rayo Rojo Ltda.”, que luego, al realizar una molienda acentuada (80 % menor a malla 200) en escala de laboratorio se logra conseguir una máxima liberación de oro, la cual es atrapada con

cierta facilidad por la centrifuga Falcon SB-40, cuyo producto preconcentrado reporta una ley de 543,10 g Au/t con una recuperación en la etapa que alcanza a 68,99 % respecto al contenido de oro en la cabeza. La presencia de oro físico relativamente grueso en el producto final, indica que el actual proceso de beneficio de mineral aurífero aplicado por la cooperativa en su ingenio no es el más adecuado, en vista de que, en esta modalidad de trabajo, no logran liberar suficientemente sus valores de oro en las muestras sometidas al proceso, probablemente por la escasa mecanización de su planta de procesamiento.

En base al flujograma experimental y los resultados obtenidos en esa etapa, para la implementación de la Planta Piloto destinado al procesamiento de piritas auríferas, se ha desarrollado el circuito que se muestra en figura 4.

7. INVERSIONES

El requerimiento de recursos económicos para encarar el presente proyecto de implementación de Planta Piloto, se muestra en tabla 5.

8. EVALUACION ECONOMICA Y SOCIAL

El presupuesto de ingresos, costos y utilidades anuales muestra una proyección positiva para los seis años de operación del Proyecto. El flujo de

fuentes y el uso de fondos del Proyecto permitieron establecer una adecuada capacidad de pago del proyecto y determinar flujos netos anuales con un superávit que denota la rentabilidad financiera de la inversión.

Tabla 5. Inversiones para la Planta Piloto (\$US)

ITEM	DESCRIPCIÓN	TOTAL (\$US)
1	Maquinarias y equipos	31.378
2	Construcciones civiles	10.721
3	Instalaciones básicas	5.365
4	Oficinas, talleres y servicios	1.550
6	Capital de operación	11.879
7	Capacitación	300
8	Imprevistos	3.060
TOTAL INVERSIÓN		64.253

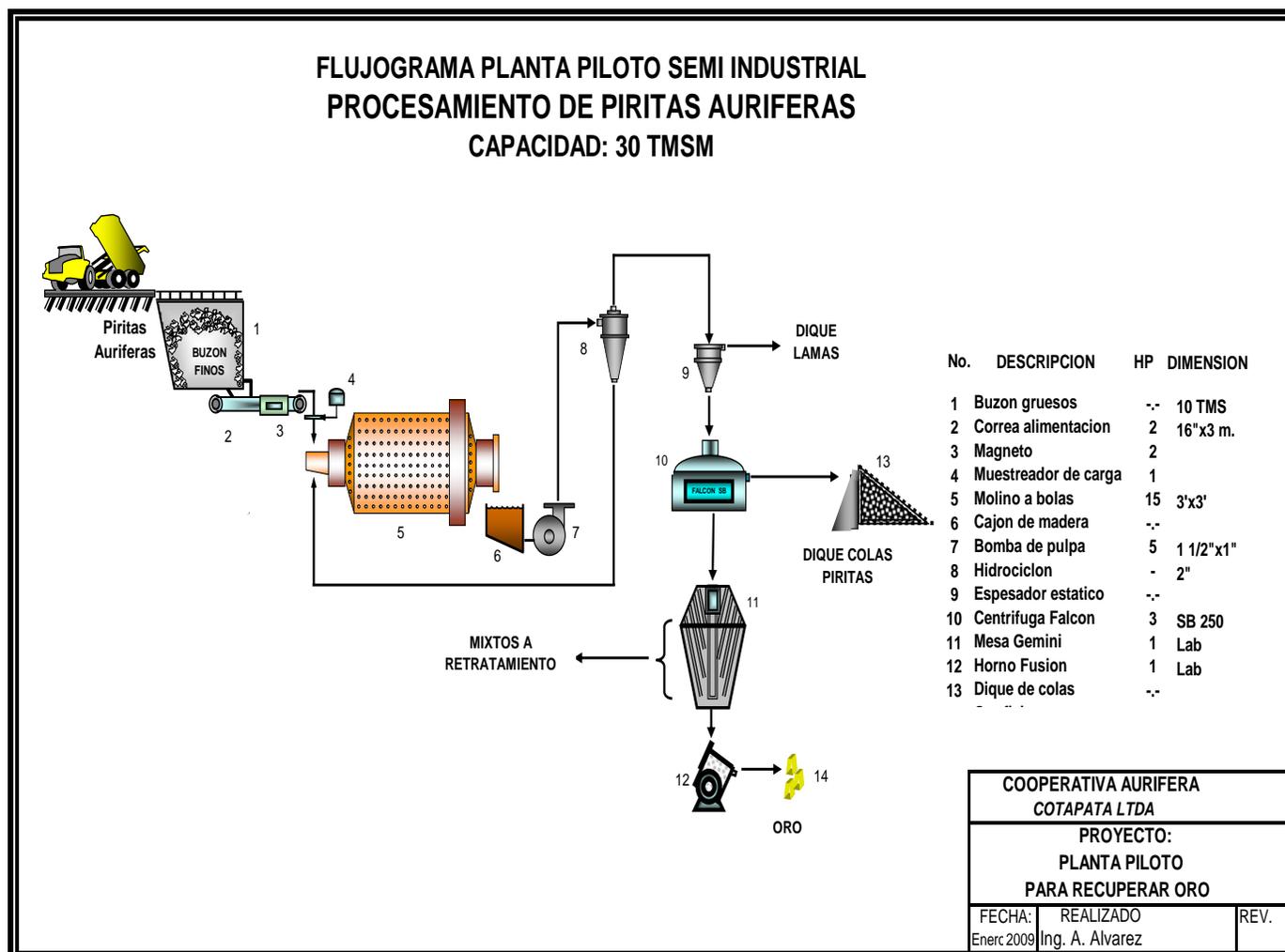


Figura 9: Flujo grama de la Planta Piloto Semi Industrial Propuesto

La rentabilidad ha sido cuantificada a partir del cómputo del Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno, para un horizonte de seis años de actividad. Para estimular la acogida de las instituciones que canalizan financiamientos a nuevas actividades emprendedoras, se consideró que una tasa de descuento del 12% anual constituye una medida razonable del costo de oportunidad del capital. Con esta tasa de descuento, se actualizaron los Flujos Netos del proyecto y se obtuvo un VAN de 122.195 \$US, que muestra la conveniencia de la Inversión. Con los resultados obtenidos en el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), se ha establecido la Tasa Interna de Retorno. El valor calculado es de 38%. Este indicador confirma y demuestra el alto grado de rentabilidad de la inversión.

Para el análisis de sensibilidad, se han considerado variaciones en la Capacidad de la Planta Piloto; en la Ley de cabeza del mineral; en la cotización internacional de oro y en la recuperación metalúrgica obtenida en la planta. El resumen de los resultados se expresa en la tabla 6.

La evaluación social es positiva desde el punto de vista de una inversión que es capaz de generar empleos directos, indirectos y una fuerza de trabajo calificada en el ámbito tecnológico de la minería y de la transformación industrial del oro. Las familias que dependen de las cooperativas auríferas podrán mejorar sus ingresos económicos y hacer inversiones sociales en el marco de sus estatutos, en procura de mejorar sus condiciones de vida y su desarrollo humano.

Tabla 6. Análisis de sensibilidad del proyecto

VARIABLES	INDICADOR LÍMITE
Cotización de oro (\$us/o.t.)	731,34 \$us/o.t.
Ley de cabeza (g Au/TMS)	30,58 g Au/t.
Capacidad Planta Piloto (t/mes)	24.96 t/mes
Recuperación Metalúrgica (%)	52%

1 CONCLUSIONES

- Las leyes de cabeza de las muestras sometidas a estudio son: "Cotapata Ltda." = 45,38 g Au/t, "Yani Ltda." = 55 g Au/t y "Rayo Rojo Ltda." = 28 g Au/t.
- Cuando la carga se reduce a 80 % -200 mallas, se alcanza muy buena liberación de valores y en estas granulometrías se logran las máximas recuperaciones, estas son:

Coop. Aurífera	% Recuperación (Au Físico)
Cotapata Ltda.	63,27
Yani Ltda.	30,94
Rayo Rojo Ltda.	68,99

- Las condiciones de operación de la centrifuga Falcon SB-40 fueron: 5 PSI de presión de agua, 30 % sólidos en alimentación y 300 G's de fuerza centrifuga.
- El uso del centrífugo Falcon SB-40 como preconcentrador de cargas auríferas seguida de un procedimiento gravimétrico convencional (mesas Gemini) para la limpieza de preconcentrados permitir obtener adecuadas

recuperaciones de oro respecto al total alimentado al proceso.

- El procedimiento metalúrgico analizado (tecnología limpia) es apropiada para el procesamiento de piritas auríferas donde el elemento valioso se encuentra finamente diseminada, muy característico de los minerales auríferos de nuestra región.
- 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.

1 IBLIOGRAFIA

1. Cliffoord D. (1999). "Concentración Gravimétrica". *Mining Journal* [Edición en español]. Septiembre. Vol. 181, No. 3.
2. Taggart H.F. (1968). *Elementos de preparación de minerales*. Madrid: Ediciones Interciencia.
3. Hinojosa O., Salas A. (1998). "Concentración centrífuga de menas estanníferas". III Congreso Nacional de Metalurgia y Ciencia de los Materiales. Oruro, Bolivia. Pag. 11. Facultad Nacional de Ingeniería. Carrera de Metalurgia.
4. Sandvick K., Rein A. (1977). "Gravity separation of bulk products in centrifugal fields". XX

- International Mineral Processing Congress*, Aachen, Alemania, Vol 2, Pag. 599. Publisher: GDMB Gesellschaft fur Bergbau, Metallurgie, Rohstoff-und Umwelttechnik.
5. Fedotov K. V., Beloborodov V. I., Leonov S. B. y Lestra K. H. (1997). "Recovery of fine gold using efficient gravity separators". *XX International Mineral Processing Congress*, Aachen, Alemania. Vol 2, Pag. 551. Publisher: GDMB Gesellschaft fur Bergbau, Metallurgie, Rohstoff-und Umwelttechnik.
 6. Álvarez A. (2006). "Concentración centrífuga, una alternativa para recuperar oro fino a partir de residuos gravimétricos". *Tecnologías limpias en industrias extractivas. Jornadas Iberoamericanas*. Santa Cruz – Bolivia. CYTED.
 7. Álvarez A., Rocha J. (2007). "Alternativas de tratamiento de piritas auríferas para la disminución de impactos ambientales". *VII Conferencia Internacional sobre Tecnologías Limpas-Industria Minera*. Buzios – Brasil.

CYTED.

8. Casseres Carrisso R. C., Pinto Chaves A., "Mecanismos Actuales na Concentração Gravítica e Principais Equipamentos Utilizados na Concentração Centrífuga", *Série Tecnologia Mineral*, Brasil 2003.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo se ha realizado en el marco de la convocatoria Proyectos de Innovación Productiva y Tecnológica organizada por el Programa de Investigación Estratégica en Bolivia (PIEB), en consecuencia, los autores de este informe muestran su profundo agradecimiento a PIEB por la cooperación económica recibida y de igual manera a la Carrera de Ingeniería Industrial y Post Grado e Interacción Social (DIPGIS) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) por la coordinación del mismo.