

Recuperación de oro y plata de minerales sulfurados en una matriz de cuarzo

Gold and silver recuperation of sulphured minerals in a quartz matrix

Vidal Sixto Aramburú Rojas*, **Pablo Antonio Núñez Jara***, **Ángel Azañero Ortiz***, **Sósimo Fernández Salinas***, **Pedro Gagliuffi Espinoza***, **Pilar Angélica Avilés Mera***, **Elvis Portocarrero Albildo****, **Holger Acosta Cabezas****

RESUMEN

El mineral que es materia del presente trabajo de investigación proviene del departamento de la Libertad, provincia de Otuzco, de la compañía minera Koricolqui S.A. El estudio por difracción de rayos x confirma que el mayor componente de la muestra es cuarzo en un 91,74 %.

En la caracterización de la muestra por el método de microscopía polarizante de luz reflejada, se observan los siguientes minerales: electrum, arsenopirita, marcasita, calcosita, calcopirita, galena, esfalerita, rutilo, goethita, tetraedrita y gangas; los cuales se encuentran como partículas muy pequeñas que dificultan su tratamiento.

Las pruebas de flotación de la muestra inicial no son satisfactorias porque las recuperaciones son bajas tanto para oro y plata que es de 59,11% y 52,51% respectivamente. Por eso previamente se realizó una preconcentración con el centrífugo "Falcon" y el relave del "Falcon" recién entra al proceso de flotación. Los resultados en estas condiciones mejora sustancialmente llegando a recuperaciones de oro y plata de 85,67% y 75,72% respectivamente con una granulometría de 64% - 200 malla.

Paralelamente se corrieron pruebas de cianuración con la muestra inicial para: 12, 18, 24, 30 y 36 horas, con la misma granulometría que se trabajó en la flotación. Los resultados indican que para 36 horas de lixiviación se obtiene una recuperación de oro de 81,21%, en cambio para la plata es baja en un 49,81%.

Palabras clave: Recuperación, cuarzo, sulfurado, flotación, cianuración.

ABSTRACT

The mineral That is matter of the present work of investigation comes from the department of the Libertad, province of Otuzco, the mining company Koricolqui S.A. The study by the x- rays diffraction confirms that the greater component of the sample is quartz in 91,74 %.

In the characteristic of the sample by the method by polarizing microscope of reflected light, the following minerals are observed: electrum, arsenopirita, marcasite, calcosita, galena, esfalerita, rutilo, goethite, tetraedite and gangues; which are like very small particles that they make difficult his treatment.

The tests of flotation of the initial sample are not satisfactory because the recoveries are as much for low gold and silver that is of 59,11% and 52,51% respectively. For that reason previously I am made a preconcentration with the centrifugal "Falcon" and relave of the "Falcon" just enters the flotation process. The results in these conditions improve substantially arriving at recoveries from gold and silver from 85,67% and 75,72% respectively with a granulometría from 66% -200 mesh.

Parallely cyaniding tests were run with the initial sample stops: 12,18,24,30 and 36 hours, with the same granulometría that work in the flotation. The results indicate that even 36 hours of leaching a gold recovery is obtained of 81,21%, however for the silver is low in 49,81%.

Keywords: Recovery, quartz, sulfurated, flotation, cyaniding.

* Docentes de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. (vidalaramburu@hotmail.com).

** Alumnos de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

INTRODUCCIÓN

En el departamento de la Libertad, específicamente en la provincia de Otuzco, los pobladores se dedican a la pequeña y mediana minería. Las mineralizaciones de estos yacimientos son polimetálicas, mayormente con contenidos apreciables de oro y plata. En muchos lugares de esta provincia y también a lo largo y ancho del país se encuentra mineralizaciones de oro y plata conjuntamente con los minerales sulfurados, donde el mayor componente es el cuarzo; estos minerales auríferos con contenidos apreciables de plata son tratadas en muchas ocasiones en plantas convencionales que se tiene en la zona; como consecuencia de estos tratamientos se tiene bajas recuperaciones de oro-plata, con consumos de reactivos elevados, por eso existen muchos yacimientos abandonados con estas características.

Además a nivel mundial la tendencia de las tecnologías existentes y de las nuevas es encontrar procesos no contaminantes, que puedan producir beneficios económicos, acorde con las reglamentaciones ambientales.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación realizada se basa en el diseño de pruebas experimentales a nivel del laboratorio, utilizando los ambientales de la EAP Ingeniería Metalúrgica, Geológica de la UNMSM y también en INGEMMET, Tecsup.

Objetivos

- Caracterización de la muestra en estudio.
- Procesos de concentración gravimétrica.
- Flotación de minerales, donde el mayor componente es el cuarzo.
- Aplicar procesos de cianuración.

Hipótesis

Para la pequeña y mediana minería, la evaluación de los procesos metalúrgicos es importante porque permitirá mejor la productividad, ya sea aumentando la recuperación y reduciendo el consumo de reactivos con una tecnología limpia y apropiada.

Como hipótesis se plantea encontrar un proceso o procesos metalúrgicos adecuados, que permitirá recuperar oro-plata de minerales sulfurados en una matriz de cuarzo y que sea económicamente rentable.

Equipamiento

Equipos empleados en la investigación de los procesos metalúrgicos:

- Chancadora primaria y secundaria
- Molino de bolas
- Celdas de flotación
- Rodillos de lixiviación en botella
- Concentrador centrífugo Falcon
- Hornos mufla
- Pulverizadora
- Balanza analítica

Tabla 1. Composición de la muestra según difracción de rayos X realizados en INGEMMET.

Mineral	Fórmula	%
Cuarzo	SiO ₂	91,74
Ortoclasa	(K, Ba, Na)(Si, Al)4O	83,84
Algirita	NaFeSi2O ₆	0,88
Lepidocrosita	FeO(OH)	0,81
Muscovita	KAl2Si3AlO10(OH) ₂	0,67
Pirita	FeS ₂	0,61
Hematita	Fe ₂ O ₃	0,57
Eucryptita	LiAlSi ₄ O ₄	0,51
Cloromagnesita	MgCl ₂	0,37

Caracterización de la muestra

El mineral en estudio se ha observado mediante el método de Microscopia Polarizante de Luz Reflejada, para lo cual se ha confeccionado una briqueta pulida, sobre la cual se ha realizado previamente la caracterización mineralógica, sobre ésta se llevó a cabo el análisis modal cuyos resultados se dan en las tablas 2, 3, 4, 5 y 6. En la tabla 4 se puede deducir:

- Minerales auríferos: Se ha observado un solo grano de electrum.
- Minerales argentíferos: Se han observado minerales de plata como la proustita y aquellos que son portadores de este elemento, tales como el electrum, la galena y la tetraedrita
- Minerales ferríferos: Como minerales ferríferos están la pirita, la arsenopirita, la marcasita y la goethita.
- Minerales cupríferos: Como minerales de cobre están calcosita, la calcopirita y la tetraedrita.
- Minerales zincíferos: Como mineral de zinc se ha observado a la esfalerita.
- Minerales plumbíferos: Como mineral de plomo se halla la galena.
- Otros minerales: En este grupo se encuentran el rutilo y las gangas.

Distribución volumétrica y grados de liberación

La distribución volumétrica que se proporciona es en términos de volumen porcentual, del mismo modo los términos de los grados de liberación se dan en porcentaje, se pueden observar en las tablas 5 y 6.

Tabla 2. Tipos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa (muestra: + 200 m)

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num. Part.	Dist. Porc.	Posibilidades de liberación completa
		656	93.31	
py-GGs	1aI	1	0.14	Fácil
	1aII	1	0.14	Fácil
	1bII	1	0.14	Moderadamente fácil
	1dII	5	0.71	Imposible
	1eI	19	2.70	Muy difícil a imposible
	1eII	9	1.28	Muy difícil a imposible
mc-GGs	1bII	2	0.28	Moderadamente fácil
	4cI	1	0.14	Muy difícil a imposible
rt-GGs	1aI	1	0.14	Fácil
gt-GGs	1aI	2	0.28	Fácil
	1aIII	4	0.57	Fácil
py-rt-GGs	1bII	1	0.14	Moderadamente fácil
T o t a l		703	100.00	

Tabla 3. Tipos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa (muestra: - 200 m)

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Núm. Part.	Dist. Porc.	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		993	99.60	
py-GGs	1aI	2	0.20	Fácil
	1cI	2	0.20	Muy difícil
Total		997	100.00	

Tabla 4. Minerales observados y minerales que se han intervenido en el análisis modal.

Minerales	Fórmula	Abreviatura	Minerales
ELECTRUM	(Au,Ag)	el	ELECTRUM
Pirita	FeS ₂	py	Pirita
Arsenopirita	FeAsS	apy	Arsenopirita
Marcasita	FeS ₂	mc	Marcasita
Calcosita	Cu ₂ S	cc	Calcosita
Calcopirita	CuFeS ₂	cp	Calcopirita
Galena	PbS	gn	Galena
Esfalerita	ZnS	ef	Esfalerita
Rutilo	TiO ₂	rt	Rutilo
Goethita	FeO.OH	gt	Goethita
Tetraedrita	(Cu, Fe, Ag) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	td	Tetraedrita
Gangas		GGs	Gangas

Tabla 5. Distribución volumétrica y grados de liberación de los minerales observados (muestra +200m).

Minerales	N		Pirita		Marcasita		Rutilo		Goethita		Gangas	
	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
Total partículas libres	656		5		1		0		5		645	
% vol. partículas libres	93,31		0,71		0,14		0,00		0,71		91,75	
Total partículas entrelazadas	N	%V	Pirita		Marcasita		Rutilo		Goethita		Gangas	
py-GGs	36	5,12	2,20	0,31								
mc-GGs	3	0,43			1,20	0,17					1,80	0,26
rt-GGs	1	0,14					0,01	0,01			0,99	0,14
gt-GGs	6	0,85							2,10	0,30	3,90	0,55
py-rt-GGs	1	0,14	0,01	0,00			0,10	0,01			0,89	0,13
Total entrelazadas	47	6,69	2,21	0,31	1,20	0,17	0,11	0,02	2,10	0,30	5,89	
Total part. libres + entrel.	703	100,00	7,21		2,20		0,11		7,10			
Total volumen porcentual	100,00		1,03		0,31		0,02		1,01			
Grados de Libertad porcentual							0,00					

Símbolo: N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizables.
 % vol = volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.

Tabla 6. Distribución volumétrica y grados de liberación de los minerales observados (muestra -200m).

Minerales	N		Galena		Pirita		Marcasita		Arsenopirita		Goethita		Gangas	
	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
Total partículas libres	993		1		56		3		2		4		927	
% vol. partículas libres	99,60		0,1		5,62		0,30		0,20		0,40		92,98	
Total partículas entrelazadas	N	%V	Galena		Pirita		Marcasita		Arsenopirita		Goethita		Gangas	
py-GGs	4	0,40			0,40	0,04							3,60	0,36
Total de entrelazadas	4	0,40			0,40	0,04							3,60	0,36
Total part. libres + entrel.	997	100,00	1,00		56,40		3,00		2,00		4,00		930,60	
Total volumen porcentual			0,10		5,66		0,30		0,20		0,40		93,34	
Grados de libertad porcentual			100,00		99,29		100,00		100,00		100,00		9,61	

Símbolo: N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizables.
 % vol = volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.

PRUEBAS EXPERIMENTALES**Pruebas de flotación muestra inicial**

Peso de mineral: 1000 gr

Flotación Rougher

Tiempo de acond.	: 5 min.
Tiempo de flotación	: 15 min
RPM	: 1500
pH	: 7
Z-11 (5%)	: 0.15 Kg/Tn
Cytec RAG 3	: 2 gotas
Cytec 3418 A	: 2 gotas
Espumante Cytec 76-A	: 1 gota

Flotación Cleaner

Zantato Z-11	: 0.1 Kg./ Tn
Cytec 3418 A	: 1 gota
Cytec RAG 3	: 1 gota
Espumante	: 1 gota

Pruebas de concentración “Falcón”

El principio de los concentradores Falcón es la gravimetría y la centrifugación. Estos pueden recuperar partículas ultrafinas liberadas (debajo de 10 μ) y hacen una alta calidad de separación. En algunas instancias pueden alcanzar un 80% del total de producción de la planta dependiendo del porcentaje del mineral nativo presente.

Estos equipos requieren poco mantenimiento y es de fácil uso. Es recomendable para el tratamiento de oro libre, plata y recuperación de platino, en la carga circulante de los circuitos de molienda y en la limpieza de los concentrados.

Condiciones de operación

Presión H ₂ O:	3PSI
Gravedad:	200 G
Autopac:	69.89 Hz

Tabla 7. Prueba de flotación: Balance metalúrgico (flotación para Au).

Componente	Peso (gr)	Ley Au (gr/TM)	Contenido fino	% Recup.
Cabeza	1000	6,63	6630	
Concentrado	20	150,22	3004,4	59,11
Medios	58,2	15,71	914,3	
Relave	921,8	1,3	1198,3	
Cabeza calculada		5.12		Rc = 50

Tabla 8. Prueba de flotación: Balance metalúrgico (flotación para Ag).

Componente	Peso (gr)	Ley Au (Oz/TM)	Contenido fino	% Recup.
Cabeza	32,15	14,4	462,96	
Concentrado	0,643	239,86	154,23	52,51
Medios	1,871	47,51	88,89	
Relave	29,636	2,67	79,13	
Cabeza calculada	10,20			Rc = 50

Tabla 9. Prueba de concentración Falcón: Balance metalúrgico para Au.

Componente	Peso (gr)	Ley Au (gr/TM)	Contenido fino	% Recup.
Cabeza	5000	6,61	33050,00	
Concentrado	75,95	135,5	10291,23	31,14
Relave	4924,05	2,99	14722,91	
Cabeza calculada		5,0		Rc = 65,08

Tabla 10. Prueba de concentración Falcón: Balance metalúrgico para Ag.

Componente	Peso (gr)	Ley Au (gr/TM)	Contenido fino	% Recup.
Cabeza	160,75	14,4	2314,80	
Concentrado	2,44	79,38	193,69	8,37
Relave	158,31	6,45	1021,10	
Cabeza calculada		7,56		Rc = 65,08

Tabla 11. Prueba de flotación de relave Falcón: Balance metalúrgico (flotación para Au).

Componente	Peso (gr)	Ley Au (gr/TM)	Contenido fino	% Recup.
Cabeza	1000	2,99	2990	
Concentrado	20,80	38,29	796,43	54,63
Medios	99,3	8,40	834,12	
Relave	879,9	1,90	1671,81	
Cabeza calculada		3,30		Rc = 48,1

Tabla 12. Prueba de flotación de relave Falcón: Balance metalúrgico (flotación para Ag).

Componente	Peso (gr)	Ley Au (gr/TM)	Contenido fino	% Recup.
Cabeza	32,15	6,45	207,37	
Concentrado	0,67	85,51	57,29	67,35
Medios	3,19	25,82	82,37	
Relave	28,29	3,26	92,23	
Cabeza calculada		7,21		Rc = 48,1

PRUEBAS DE CIANURACIÓN

Condiciones de operación en cianuración

Peso de mineral composito (gr): 300
 Gravedad específica (g.e) : 2,9

Granulometría del mineral : 64% -200m.
 Dilución (l/s) : 2/1.
 Ph cianuración : 10.5-11.
 Tiempo de cianuración (h) : 12,18, 24, 30, 36
 Concentración de cianuro : 0,15%

Tabla 13. Prueba de cianuración: Balance metalúrgico de cianuración para Au (12 h).

Componente	Peso	Ley Au (gr/TM)	Contenido fino	% Recup.
Cabeza (gr)	300	6,61	1983	
Sol, rica (ml)	600	1,67	1002	62,55
Relave (gr)	300	2,0	600	
Cabeza calculada	5,34			
Consumo de cianuro	1,2 kg/TM			
Consumo de cal	19,13 kg/TM			

Tabla 14. Balance metalúrgico de cianuración para Ag (12 h).

Componente	Peso (gr)	Ley Ag (gr/TM)	Contenido fino	% recup.
Cabeza (gr)	300	14,40	134 352	
Sol. rica (ml)	600	63,84	38 304	36,9
Relave (gr)	300	218,32	65 496	
Cabeza calculada		11,12		

Tabla 15. Balance metalúrgico de cianuración para Au (18 h).

Componente	Peso (gr)	Ley Ag (gr/TM)	Contenido fino	% recup.
Cabeza (gr)	300	6,61	1983,00	
Sol. rica (ml)	600	1,81	1086,00	67,92
Relave (gr)	300	1,71	513,00	
Cabeza calculada		5,33		
Consumo de cianuro	1,5 kg/TM			
Consumo de cal	19,18 kg/TM			

Tabla 16. Balance metalúrgico de cianuración para Ag (18 h).

Componente	Peso (gr)	Ley Ag (gr/tm)	Contenido fino	% recup.
Cabeza (gr)	300	14,40	134 352,00	
So. rica (ml)	600	75,32	45 192,00	41,25
Relave (gr)	300	214,59	65 496,00	
Cabeza calculada		11,74		

Tabla 17. Balance metalúrgico de cianuración para Au (24 h).

Componente	Peso	Ley Au (gr/TM)	Contenido fino	% recup.
Cabeza (gr)	300	6,61	1983,00	
Sol. rica (ml)	600	2,63	1578,00	76,45
Relave (gr)	300	1,62	486,00	
Cabeza calculada		6,88		
Consumo de cianuro	1,7 kg/TM			
Consumo de cal	19,22 kg/TM			

Tabla 18. Balance metalúrgico de cianuración para Ag (24 h).

Componente	Peso (gr)	Ley Au (gr/TM)	Contenido fino	% recup.
Cabeza (gr)	300	14,40	134 352,00	
Sol. rica (ml)	600	78,23	46 938,00	42,24
Relave (gr)	300	213,97	64 191,00	
Cabeza calculada		11,92		

Tabla 19. Balance metalúrgico de cianuración para Au (30 h).

Componente	Peso	Ley Au (gr/TM)	Contenido fino	% recup.
Cabeza (gr)	300	6,61	1 983,00	
Sol. rica (ml)	600	2,49	1 494,00	77,33
Relave (gr)	300	1,46	438,00	
Cabeza calculada		6,44		
Consumo de cianuro	1,8 kg/TM			
Consumo de cal	19,26 kg/TM			

Tabla 20. Balance metalúrgico de cianuración para Ag (30 h).

Componente	Peso (gr)	Ley Ag (gr/TM)	Contenido fino	% recup.
Cabeza (gr)	300	14,40	134 352,00	
Sol. rica (ml)	600	81,16	48 696,00	43,94
Relave (gr)	300	207,13	62 139,00	
Cabeza calculada		11,88		

Tabla 21. Balance metalúrgico de cianuración para Au (36 h).

Componente	Peso	Ley Au (gr/tm)	Contenido fino	% recup.
Cabeza (gr)	300	6,61	1983,00	
Sol, Rica (ml)	600	2,68	1 608,00	81,21
Relave (gr)	300	1,24	372,00	
Cabeza calculada	6,60			
Consumo de cianuro	1,9 kg/TM			
Consumo de cal	19,36 kg/TM			

Tabla 22. Balance metalúrgico de cianuración para Ag (36 h).

Componente	Peso (gr)	Ley Ag (gr/tm)	Contenido fino	% recup.
Cabeza (gr)	300	14,40	134 352,00	
Sol, Rica (ml)	600	87,07	52 242,00	49,86
Relave (gr)	300	175,09	52 527,00	
Cabeza calculada		11,23		

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

- La flotación de la muestra inicial no es satisfactorio por que se obtiene recuperaciones relativamente bajas tanto en oro y plata de 59,11%, 52,51% respectivamente, con un radio de concentración de 50.
- En cuanto a la calidad del concentrado se obtiene 150,22 gr/TM de oro y 239,86 Oz/TM de plata.
- Se nota la diferencia de la cabeza calculada con la ensayada, fundamentalmente en plata; lo cual significa repetir la prueba y el análisis químico de la cabeza.
- Los equipos "Falcon", mayormente trabajan como preconcentración, por eso las recuperaciones son bajas, los concentrados son bastante aceptables, lo cual indica que el oro y la plata se encuentran como partículas muy finas, asociado a otros elementos, como se ha observado en la microscopia.
- El radio de concentración obtenido en la prueba de concentración centrífuga "Falcon" es 65.8.
- Para el caso del oro, sumando la concentración centrífuga "Falcon" y la flotación de relave "Falcon", se obtiene una recuperación de 85,67%.
- Para el caso de la plata, con la concentración centrífuga "Falcon" y la flotación del relave "Falcon", se obtiene una recuperación de 75,72%.
- La granulometría tanto para concentración centrífuga "Falcon" y flotación de relave "Falcon" es de 64% -200 malla.
- La remolienda tanto para la concentración "Falcon" y el relave de "Falcon" debe mejorar tanto

en calidad de concentrado y fundamentalmente en la recuperación de oro y plata.

- La cinética de cianuración es rápida dentro de las 24 horas para el oro, llegando a 76,45% de recuperación.
- Para el caso de la plata, se obtiene bajas recuperaciones, inclusive con 36 horas de cianuración se tiene 49.86%.
- Si se realiza una remolienda las recuperaciones tanto en oro y plata pueden mejorar, por que en este caso se ha trabajado con una granulometría de 64% -200 malla.
- El consumo de cianuro esta dentro del rango de 2kg/TM y la cal en 19 kg/TM.
- Observamos que en 36 horas de lixiviación se obtiene una recuperación de 81,21 %, significa que se puede alargar el tiempo de cianuración.

CONCLUSIONES

- La flotación de la muestra inicial no es satisfactoria porque las recuperaciones son bajas, tanto en oro y plata de 59,11% y 52,51%, respectivamente.
- Realizando previamente una preconcentración con el centrífugo "Falcon" y flotando del relave de estos equipos, mejora la recuperación tanto en oro y plata, obteniéndose 85,67% y 75,72%, respectivamente.
- Con la cianuración directa para 36 horas de lixiviación, se obtiene una recuperación de 81,21% para oro, en cambio para la plata es baja llegando a 49,86%.
- El tratamiento adecuado de este tipo de minerales, en base en la investigación realizada lo cual requiere una preconcentración con los equipos gravimétricos-

centrifugación como el "FALCON" y recién el relave se somete a la flotación, para que el proceso sea económicamente rentable. La explicación es que un porcentaje apreciable de partículas de oro y plata se encuentra en tamaños muy finos.

AGRADECIMIENTO

Al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica; al Consejo Superior de Investigaciones; a la Dirección y Coordinación de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM. Finalmente a los profesores y alumnos que han colaborado en el desarrollo del Proyecto de Investigación N° 061601081.

BIBLIOGRAFÍA

1. Barsky, G; Swaison, S.J. y Easley, N. "Dissolution of gold and silver in cyanide solutions".
2. Canseco D.E. *Metalurgia de oro y plata*. Editorial UNI, Lima-Perú.
3. Misari CH, F. *Metalurgia del oro*, vols. I y II.
4. Nagy, I, Mrkusic, P Y mcculloch, H.W. *Chemical treatment of refractory gold ores*.
5. Sobral S.,L.G. Curso: Tecnología actual de los procesos de recuperación de oro y plata".
6. Pérez, L, "Molienda factor decisivo en la recuperación de oro", V convención regional de Ingenieros de minas.
7. Macassi, J. y Rivas, E. "Nuevas técnicas hidrometalúrgicas, para mejorar la extracción de oro y plata en materiales piríticos". I Simposium Internacional de metalurgia. Tecsup-Lima.