

Modelo matemático para la recuperación de oro y zinc mediante el proceso de flotación a partir de minerales sulfurados de zinc marmatítico en la provincia de Casma – Ancash

Mathematical model for the recovery of gold and zinc through the flotation process from marmatic zinc sulfured minerals in the province of Casma – Ancash

Vidal Sixto Aramburú Rojas^{1,a}, Julia Marilú Calderón de Alvarado^{1,b}, Aldo Joel Adama Navarro^{1,c}, Jorge Alberto Ortiz Barreto^{1,d}, Luís Santiago Gutiérrez Falcón^{1,e}, Luís Enrique Quispe Gallegos^{1,f}

Recibido: 12/01/2022 - Aprobado: 16/08/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

El presente estudio de investigación demuestra que es viable la recuperación de oro y zinc en minerales de zinc marmatítico con contenido de oro. Se analizó la recuperación de oro y zinc mediante diseños experimentales factoriales, utilizando los reactivos: CuSO₄, AR-3418 y AR-1242 como variables independientes; el resto de las variables se mantuvieron constantes.

Como resultado de la investigación se obtuvo un modelo para la recuperación de oro y zinc, realizando el análisis del diseño factorial ajustado como se indica:

Recuperación de Au = 83.40 + 0.00600 CuSO₄ + 0.110 AR-3418 + 0.035 AR-1242 + 0.000313 CuSO₄*AR 3418 + 0.000275 CuSO₄*AR-1242 - 0.00800 AR-3418*AR-1242 - 0.000011 CuSO₄*AR-3418*AR-1242.

Asimismo, la recuperación de Zn = 73.14 + 0.0100 CuSO₄ + 0.132 AR-3418 + 0.051 AR-1242 + 0.000164 CuSO₄*AR-3418 + 0.000131 CuSO₄*AR-1242 - 0.00811 AR-3418*AR-1242 - 0.000004 CuSO₄*AR-3418*AR-1242.

Palabras claves: modelo matemático, recuperación, caracterización, flotación, diseño factorial.

ABSTRACT

The present research study demonstrates that the recovery of gold and zinc in gold-containing marmatitic zinc ores is feasible. The recovery of these metals was analyzed by factorial experimental designs, using the reagents: CuSO₄, AR-3418 and AR-1242 as independent variables, while all other variables remained constant.

As a result of the research, a mathematical model was obtained for the recovery of gold and zinc, performing the adjusted factorial design analysis, as indicated:

Recovery of gold (Au) = 83.40 + 0.00600 CuSO₄ + 0.110 AR-3418 + 0.035 AR-1242 + 0.000313 CuSO₄ * AR 3418 + 0.000275 CuSO₄ * AR-1242 - 0.00800 AR-3418 * AR-1242 - 0.000011 CuSO₄ * AR-3418 * AR-1242.

Likewise, the recovery of zinc (Zn) = 73.14 + 0.0100 CuSO₄ + 0.132 AR-3418 + 0.051 AR-1242 + 0.000164 CuSO₄ * AR-3418 + 0.000131 CuSO₄ * AR-1242 - 0.00811 AR-3418 * AR-1242 - 0.000004 CuSO₄ * AR-3418 * AR-1242.

Keywords: mathematical model, recovery, characterization, flotation, factorial design.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú

a Docente Principal. Autor para correspondencia: varamburu@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-3866>

b Docente Principal. E-mail: jcalderond2@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1374-9307>

c E-mail: aldo_9_10@hotmail.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1738-4517>

d E-mail: jorge_ortiz_1986@hotmail.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5217-4510>

e E-mail: luis.gutierrez.050182@gmail.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0244-5428>

f E-mail: asesorurp@gmail.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4165-1371>

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, una de las principales fuentes de zinc son los depósitos de minerales sulfurados como la esfalerita y la marmatita, que en algunos casos se encuentran asociados a metales preciosos como el oro; estas asociaciones se pueden encontrar en gran cantidad de reservas probadas en la provincia de Casma. Dado que cada mineral es de naturaleza única y heterogénea, existe gran importancia en estudiar el comportamiento que tienen estas especies frente a los procesos de flotación.

El proceso de flotación es el principal método para beneficio de minerales sulfurados, dado que estos minerales son de naturaleza hidrofóbica, es usado para concentrar especies valiosas y separarlas de las estériles como resultado de fenómenos fisicoquímicos complejos que ocurren en las interfases mineral/agua-reactivo, agua-reactivo/aire y mineral/aire (Medina Beltran, 1982). Para lograr una buena concentración es necesario que el mineral de interés comercial se encuentre liberado de sus asociaciones (A. Azañero Ortiz et al., 2010).

Según el boletín estadístico minero emitido por el Ministerio de Energía y Minas-MINEM, en enero del 2021, Ancash mantiene su liderazgo en la producción nacional de zinc, representando el 31.2 % del total de la producción nacional. Además de esto, también dio a conocer que Perú se posicionó como primer productor de zinc (tercero a nivel mundial) y oro (octavo a nivel mundial), en Latinoamérica, en el 2020.

El presente estudio de investigación surge de la necesidad de evaluar la recuperación de concentrado de zinc y oro en minerales tipo marmatita en la provincia de Casma, en función de las variables independientes que intervienen en el proceso de flotación, para darle viabilidad a la explotación de estos tipos de yacimientos.

II. MÉTODOS

2.1. Tipo y diseño de investigación

El presente estudio de investigación es de tipo experimental, aplicando los estudios de caracterización del mineral y pruebas metalúrgicas de flotación. Estos métodos se aplicaron para lograr un máximo en la recuperación de zinc y oro en los depósitos de minerales sulfurados de tipo marmatita en la provincia de Casma.

La presente investigación es de tipo cuantitativo y deductivo, porque se manipuló, analizó e interpretó la variable dependiente (recuperación) en función de las variables independientes, ajustando una ecuación para la recuperación de oro y zinc, mediante diseño de experimentos factoriales (Gómez Bastar, 2012).

2.2. Unidad de análisis y población de estudio

La unidad de análisis se desarrolló en la provincia de Casma, lugar donde se obtuvo y procesó la información necesaria para la investigación.

La población de estudio corresponde al lote de mineral sulfurado de tipo marmatita muestreado de los yacimientos mineros en la provincia de Casma.

2.3. Selección de muestra

El mineral fue muestreado manualmente y preparado mecánicamente en el laboratorio de metalurgia extractiva de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos-UNMSM.

La muestra requerida para la investigación fue de aproximadamente 150 kg.

2.4. Procedimiento del método de investigación

- Recopilación de información sobre la problemática del estudio.
- Muestreo manual del mineral sulfurado en estudio.
- Preparación mecánica del lote de mineral representativo.
- Caracterización mineralógica y ensayos químicos del mineral de cabeza.
- Elaboración del diseño factorial empleando software Minitab 19.
- Desarrollo de la batería de pruebas de flotación según el diseño de experimentos.
- Tratamiento de la data mediante balances metalúrgicos y diseño de experimentos en Minitab 19.

2.5. Equipos y materiales (ver Tabla 1)

Tabla 1. Relación de equipos y materiales

| Equipos | Materiales |
|---------------------------|----------------------|
| Cuarteros jones | Lona |
| Chancadora de quijadas | Luna de reloj |
| Chancadora de rodillos | Bandejas |
| Ro – tap | Vaso de precipitados |
| Molino de bolas | Probetas |
| Agitador magnético | Espátulas |
| Celda de flotación Denver | Tamices |
| Horno de secado | Goteros |
| Balanza digital | Baldes |
| Microscopio óptico | Sobres para muestra |
| Potenciómetro | Cinta masking tape |
| | Tijera |
| | Marcadores |
| | Jeringas |
| | Otros |

2.6. Caracterización minerográfica

Se muestreo aproximadamente 300 gramos del mineral de cabeza y se observó mediante el método de microscopía polarizante de luz reflejada para su análisis modal, lo que nos permitió determinar las especies minerales, distribuciones volumétricas y enlaces presentes entre las especies de interés (Azañero, y otros, 2010).

Al caracterizar la muestra nos permitió tomar decisiones en base a los minerales presentes y los enlaces entre las especies valiosas, para poder disponer de una serie

de reactivos necesarios para el proceso, y poder ajustar ecuaciones para la recuperación de oro y zinc, en función de las variables independientes que se identificaron en el proceso de beneficio, mediante diseños experimentales factoriales (Cabala et al., 1990).

2.7. Desarrollo de pruebas metalúrgicas

La muestra representativa de 150 kg de mineral de cabeza tipo marmatita se cuarteó en el equipo Jones para utilizar 75 kg en el desarrollo de las pruebas metalúrgicas de flotación, y 75 kg se quedó en laboratorio como muestra testigo. La muestra en investigación se preparó mecánicamente para reducir su tamaño hasta 100% - 10 malla, haciendo uso de una chancadora de quijadas (chancado primario) y una chancadora de rodillos (chancado secundario), y tamizando la muestra después de cada trituración con una malla N°10 en la serie Tyler. Una vez obtenido un 100% - 10 malla se muestreo manualmente en lona, lotes de mineral de aproximadamente 1 000 gramos cada uno, para el desarrollo de las pruebas metalúrgicas de flotación (Cabala et al., 2000)

El mineral muestreado de aproximadamente 1 000 gramos fue alimentado al molino para determinar el tiempo necesario en el cual la especie en estudio puede observarse al microscopio como libre, siendo el tiempo necesario de molienda de 15 minutos, alcanzando una granulometría de 61.70% - 200 malla.

Se preparó reactivos colectores tipo xantato Z-6 al 1%, AR 3418 y AR 1242 al 100%; sulfato de cobre al 5% como activador y espumante MIBC al 100% para poder concentrar oro y zinc de la muestra en estudio

Las pruebas metalúrgicas de flotación se desarrollaron con un pH igual a 7, 28% de sólidos en pulpa, tiempo de acondicionamiento de 6 minutos y un tiempo de flotación de 14 minutos, variables que se consideraron constantes en el desarrollo de las pruebas metalúrgicas (Gorain et al., 1998).

III. RESULTADOS

3.1. Análisis mineralógico de la muestra en estudio

Las muestras observadas al microscopio se describen a continuación en la Tabla 2, así mismo se describe la abreviatura usada y la fórmula correspondiente.

3.2. Interpretación mineralógica

3.2.1. *Minerales zincíferos*

Como mineral de zinc se ha observado a la esfalerita, de las cuales el 99.99% pertenecen a las esfaleritas marmatíticas.

3.2.2. *Minerales auríferos*

Como mineral de oro se observó electrum y oro nativo.

3.2.3. *Minerales cupríferos*

Como mineral de cobre se observó a la calcopirita.

3.2.4. *Minerales ferríferos*

Como minerales de hierro se observaron principalmente a la arsenopirita, menikovita, pirita, marcasita, pirrotita, y otros en menor proporción (Chumbez Diaz, 2019).

3.2.5. *Otros minerales*

Principalmente compuestos por gangas.

3.3. Distribución granulométrica, tamaño y características de las especies

La Tabla 3 nos muestra la distribución en porcentaje de la especie mineral, su tamaño y características de la muestra en estudio.

3.4. Figuras de entrelazamiento de las especies presentes

Las Figuras 1 y 2, muestran las principales asociaciones referidos al zinc y oro en microfotografías del microscopio óptico.

Tabla 2. Minerales observados

| Nombre | Abreviatura | Fórmula |
|----------------|-------------|--|
| Arsenopirita | apy | FeAsS |
| Bismutinita | bmt | Bi ₂ S ₃ |
| Bismuto nativo | Bi | Bi |
| Calcopirita | cp | CuFeS ₂ |
| Electrum | el | (Au, Ag) |
| Esfalerita | ef | (Zn,Fe)S |
| Gangas | GGs | Composición variada |
| Marcasita | mc | FeS ₂ (aprox.) |
| Melnikovita | mkv | FeS ₂ |
| Oro Nativo | Au | Au |
| Pirita | py | FeS ₂ |
| Pirrotita | po | Fe _{1-x} S _x |
| Vallerita | val | 2(Fe,Cu) ₂ S ₂₃ (Mg,Al)(OH) ₂ |

Fuente: Laboratorio BISA

Tabla 3. Distribución granulométrica, tamaño y características

| Mineral (%) | Tamaño (mm) | Características y Ocurrencias |
|-------------------------|-------------|---|
| Arsenopirita (1%) | <0.25 | Cristales: Anhedrales a subhedrales Formas: romboidales e irregulares Descripción: Se presentan reemplazados por la pirrotita. |
| Pirrotita (55%) | >0.2 | Cristales: Anhedrales. Formas: Irregulares Descripción: Se presentan reemplazando a la arsenopirita. Esta reemplazado por la calcopirita. |
| Calcopirita (trazas) | <0.1 | Cristales: Anhedrales. Formas: irregulares. Descripción: Reemplazando a la pirrotita y diseminado en las gangas. |
| Esfalerita (5%) | >0.5 | Cristales: Anhedrales. Formas: Irregulares Descripción: Presenta oro al borde del cristal. Se halla reemplazando a la arsenopirita y calcopirita. Esta relleno cavidades en las gangas. |
| Bismuto nativo (Trazas) | <0.003 | Cristales: Anhedrales. Formas: Irregulares. Descripción: Algunos se encuentran asociado al oro diseminado en las gangas. |
| Oro (Trazas) | <0.03 | Cristales: Anhedrales. Formas: Irregulares Descripción: Se presenta asociada al bismuto, a la esfalerita e incluido en las gangas. |

Fuente: Laboratorio BISA

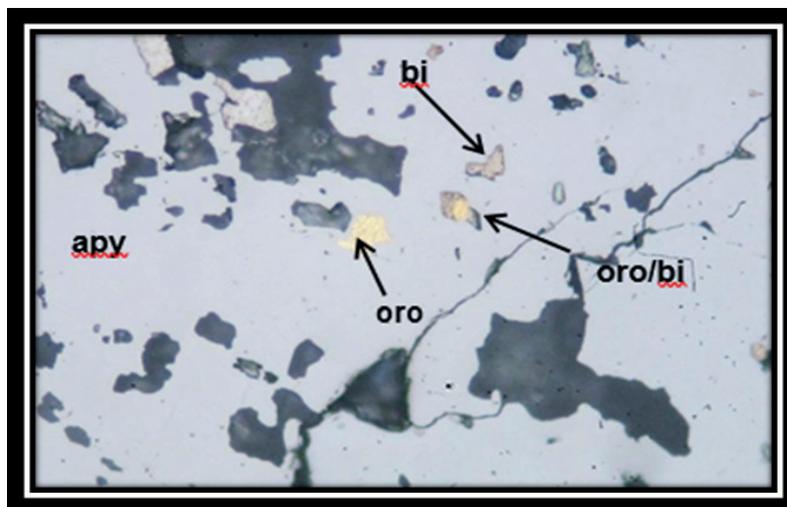


Figura 1. Granos de oro se encuentran incluidos en la arsenopirita (apy). otros granos de oro se encuentran asociados al bismuto (bi) relleno porosidades en la arsenopirita (apy)

Fuente: Laboratorio BISA

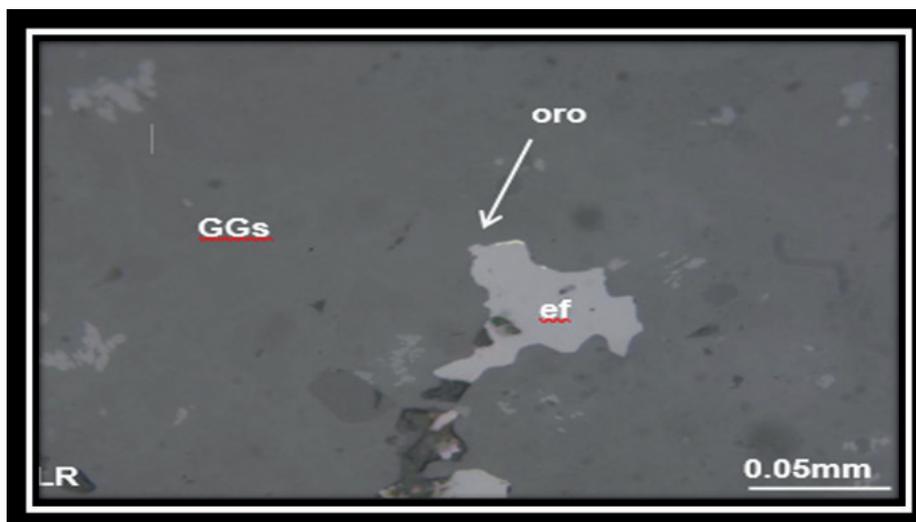


Figura 2. Granos de oro que se encuentran al borde de la esfalerita (ef). esfalerita relleno cavidades en las gangas(ggs)

Fuente: Laboratorio BISA

3.5. Análisis químico del mineral de cabeza

Aproximadamente 300 gr. de muestra representativa del lote de mineral de cabeza, se enviaron a laboratorio químico para determinar la ley de oro y zinc, y se detalla en la Tabla 4.

3.6. Elaboración y desarrollo del diseño factorial

En base a la caracterización mineralógica se elaboró un diseño factorial de experimentos de 2 niveles, 3 factores y 2 réplicas para luego desarrollar las pruebas metalúrgicas de flotación, considerando como variables independientes la dosificación de reactivos: Sulfato de cobre (5%), AR-

3418(100%) y AR-1242(100%), las demás variables que intervienen en el proceso se mantuvieron constantes. Los niveles mínimos y máximos de las variables en estudio se describen a continuación en la Tabla 5 (Chia et al., 2013).

3.6.1. Análisis de varianza para la recuperación de oro

El análisis de la varianza del diseño experimental para la recuperación de oro se describe en la Tabla 5, así también se muestra el análisis de varianza en la Tabla 6, el resumen del modelo en la Tabla 7 y los coeficientes de codificación en la Tabla 8 (Á. Azañero Ortiz et al., 2013).

Tabla 4. Ensayo químico del mineral de cabeza

| Componente | Zn (%) | Au(gr/TM) |
|----------------|--------|-----------|
| Min. de cabeza | 13.79 | 3.61 |

Fuente: Azañero Ortiz (2015)

Tabla 5. Matriz del diseño factorial y respuestas experimentales

| Orden Est | Orden Corrida | Pt Central | Bloques | CuSO4 | Reactivos | | Recuperación (%) | | Grado | |
|-----------|---------------|------------|---------|-------|-----------|---------|------------------|---------|------------|--------|
| | | | | | AR-3418 | AR-1242 | REC. Au | REC. Zn | Au (Oz/TC) | Zn (%) |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 200 | 20 | 10 | 87.4 | 77.84 | 0.281 | 30.50 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 600 | 20 | 10 | 92.1 | 83.76 | 0.279 | 28.40 |
| 3 | 3 | 1 | 1 | 200 | 40 | 10 | 88.9 | 79.76 | 0.285 | 29.70 |
| 4 | 4 | 1 | 1 | 600 | 40 | 10 | 94.4 | 85.33 | 0.296 | 27.50 |
| 5 | 5 | 1 | 1 | 200 | 20 | 20 | 85.4 | 76.03 | 0.291 | 29.10 |
| 6 | 6 | 1 | 1 | 600 | 20 | 20 | 90.7 | 81.77 | 0.281 | 26.45 |
| 7 | 7 | 1 | 1 | 200 | 40 | 20 | 85.3 | 76.94 | 0.288 | 28.80 |
| 8 | 8 | 1 | 1 | 600 | 40 | 20 | 91.5 | 83.34 | 0.271 | 26.11 |
| 9 | 9 | 1 | 1 | 200 | 20 | 10 | 86.4 | 77.02 | 0.286 | 30.62 |
| 10 | 10 | 1 | 1 | 600 | 20 | 10 | 91.9 | 82.18 | 0.300 | 28.46 |
| 11 | 11 | 1 | 1 | 200 | 40 | 10 | 87.7 | 78.11 | 0.287 | 29.75 |
| 12 | 12 | 1 | 1 | 600 | 40 | 10 | 95.6 | 85.61 | 0.293 | 27.56 |
| 13 | 13 | 1 | 1 | 200 | 20 | 20 | 86.1 | 76.82 | 0.292 | 29.22 |
| 14 | 14 | 1 | 1 | 600 | 20 | 20 | 91.4 | 82.57 | 0.306 | 26.53 |
| 15 | 15 | 1 | 1 | 200 | 40 | 20 | 84.9 | 75.35 | 0.291 | 28.93 |
| 16 | 16 | 1 | 1 | 600 | 40 | 20 | 90.7 | 81.80 | 0.283 | 26.13 |

Fuente: Azañero Ortiz (2015)

Tabla 6. Análisis de varianza para la recuperación de oro

| Fuente | GL | SC Sec | Contribución | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------|----|---------|--------------|-----------|-----------|---------|---------|
| CuSO4 | 1 | 133.403 | 79.00% | 133.4 | 133.403 | 374.46 | 0 |
| AR-3418 | 1 | 3.61 | 2.14% | 3.61 | 3.61 | 10.13 | 0.013 |
| AR-1242 | 1 | 21.16 | 12.53% | 21.16 | 21.16 | 59.4 | 0 |
| CuSO4*AR-3418 | 1 | 1.322 | 0.78% | 1.322 | 1.322 | 3.71 | 0.09 |
| CuSO4*AR-1242 | 1 | 0.062 | 0.04% | 0.062 | 0.062 | 0.18 | 0.686 |
| AR-3418*AR-1242 | 1 | 6.25 | 3.70% | 6.25 | 6.25 | 17.54 | 0.003 |
| CuSO4*AR-3418*AR-1242 | 1 | 0.203 | 0.12% | 0.203 | 0.203 | 0.57 | 0.472 |
| Error | 8 | 2.85 | 1.69% | 2.85 | 0.356 | | |

Fuente: Azañero Ortiz (2015)

3.6.2. Ecuación de regresión para la recuperación de oro en unidades no codificadas

Recuperación Au (%) = 83.40 + 0.00600 CuSO4 + 0.110 AR-3418 + 0.035 AR-1242 + 0.000313 CuSO4*AR-3418 + 0.000275 CuSO4*AR-1242 - 0.00800 AR-3418*AR-1242 - 0.000011 CuSO4*AR-3418*AR-1242.

3.6.3. Análisis de varianza para la recuperación de zinc

El análisis de la varianza del diseño experimental para la recuperación de zinc se describe en la Tabla 9, así también se muestra el resumen del modelo en la Tabla 10 y los coeficientes de codificación en la Tabla 11.

Tabla 7. Resumen del modelo

| S | R-cuad | R-cuad ajustado | PRESS | R-cuad.(pred) |
|----------|--------|-----------------|-------|---------------|
| 0.596867 | 98.31% | 96.84% | 11.4 | 93.25% |

Fuente: Azañero Ortiz (2015)

Tabla 8. Coeficiente de codificación

| Término | Efecto | Coef | Valor T | VIF |
|-----------------------|--------|--------|---------|-----|
| Constante | | 89.4 | 599.13 | |
| CuSO4 | 5.775 | 2.888 | 19.35 | 1 |
| AR-3418 | 0.95 | 0.475 | 3.18 | 1 |
| AR-1242 | -2.3 | -1.15 | -7.71 | 1 |
| CuSO4*AR-3418 | 0.575 | 0.287 | 1.93 | 1 |
| CuSO4*AR-1242 | -0.125 | -0.062 | -0.42 | 1 |
| AR-3418*AR-1242 | -1.25 | -0.625 | -4.19 | 1 |
| CuSO4*AR-3418*AR-1242 | -0.225 | -0.113 | -0.75 | 1 |

Fuente: Azañero Ortiz (2015)

Tabla 9. Análisis de varianza para la recuperación de zinc

| Fuente | GL | SC Sec | Contribución | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------|----|---------|--------------|-----------|-----------|---------|---------|
| CuSO4 | 1 | 147.028 | 83.61% | 147.028 | 147.028 | 194.92 | 0 |
| AR-3418 | 1 | 4.27 | 2.43% | 4.27 | 4.27 | 5.66 | 0.045 |
| AR-1242 | 1 | 14.028 | 7.98% | 14.028 | 14.028 | 18.6 | 0.003 |
| CuSO4*AR-3418 | 1 | 0.7 | 0.40% | 0.7 | 0.7 | 0.93 | 0.364 |
| CuSO4*AR-1242 | 1 | 0.002 | 0.00% | 0.002 | 0.002 | 0 | 0.957 |
| AR-3418*AR-1242 | 1 | 3.768 | 2.14% | 3.768 | 3.768 | 5 | 0.056 |
| CuSO4*AR-3418*AR-1242 | 1 | 0.025 | 0.01% | 0.025 | 0.025 | 0.03 | 0.859 |
| Error | 8 | 6.034 | 3.43% | 6.034 | 0.754 | | |

Fuente: (A. Azañero Ortiz, 2015)

Tabla 10. Resumen del modelo

| S | R-cuad | R-cuad ajustado | PRESS | R-cuad.(pred) |
|----------|--------|-----------------|---------|---------------|
| 0.868502 | 96.57% | 93.57% | 24.1375 | 86.27% |

Fuente: (A. Azañero Ortiz, 2015)

Tabla 11. Coeficiente de codificación

| Término | Efecto | Coef | Valor T | VIF |
|-----------------------|--------|--------|---------|-----|
| Constante | | 80.265 | 369.67 | |
| CuSO4 | 6.06 | 3.031 | 13.96 | 1 |
| AR-3418 | 1.033 | 0.517 | 2.38 | 1 |
| AR-1242 | -1.873 | -0.936 | -4.31 | 1 |
| CuSO4*AR-3418 | 0.418 | 0.209 | 0.96 | 1 |
| CuSO4*AR-1242 | 0.024 | 0.012 | 0.06 | 1 |
| AR-3418*AR-1242 | -0.971 | -0.485 | -2.24 | 1 |
| CuSO4*AR-3418*AR-1242 | -0.08 | -0.04 | -0.18 | 1 |

Fuente: (A. Azañero Ortiz, 2015)

3.6.6. Ecuación de regresión para la recuperación de zinc en unidades no codificadas

$$\text{Recuperación Zn (\%)} = 73.14 + 0.0100 \text{ CuSO}_4 + 0.132 \text{ AR-3418} + 0.051 \text{ AR-1242} + 0.000164 \text{ CuSO}_4 * \text{AR-3418} + 0.000131 \text{ CuSO}_4 * \text{AR-1242} - 0.00811 \text{ AR-3418} * \text{AR-1242} - 0.000004 \text{ CuSO}_4 * \text{AR-3418} * \text{AR-1242}$$

IV. DISCUSIÓN

En base al desarrollo del diseño experimental factorial, se evaluó como factores a la dosificación de reactivos: CuSO_4 (activador de la esfalerita) con un nivel mínimo de 200gr/TM y un máximo de 600gr/TM; AR-3418 (colector de minerales polimetálicos) con un nivel mínimo de 20gr/TM y un máximo de 40gr/TM; y AR-1242 (colector de metales preciosos); con un nivel mínimo de dosificación de 10 gr/TM y un máximo de 20 gr/TM; para el análisis de varianza de la recuperación de oro y zinc.

Estudios realizados al procesamiento por flotación de menas con alto contenido de zinc marmatítico con dosificación de Z-11, CuSO_4 y MIBC llegaron a recuperar

79.95% de Zn. En comparación con las pruebas descritas anteriormente que llegan a recuperar un máximo de 85.61% de Zn (Chumbez Diaz, 2019).

El análisis de la varianza para la recuperación de oro indicó que los reactivos CuSO_4 y AR-1242 Son los de mayor influencia en el proceso de recuperación, siendo este primer reactivo mencionado, el que ejerce una fuerte influencia sobre el proceso de beneficio.

La Figura 3, muestra la influencia de las variables independientes (CuSO_4 , AR-3418 y AR-1242) en función de la recuperación.

Los coeficientes de determinación son mayores al 90 %, lo que cual indica que el modelo matemático ajustado, para la recuperación de oro, es confiable.

El análisis de la varianza para la recuperación de zinc igualmente demostró que los reactivos CuSO_4 y AR-1242 son los que ejercen mayor influencia en la recuperación de este metal, como lo demuestra la Figura 4.

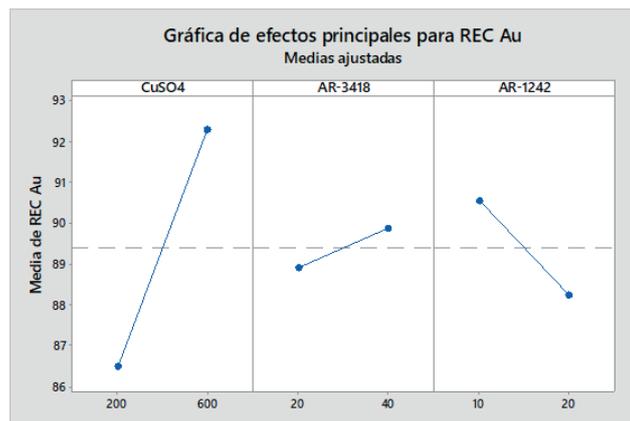


Figura 3. Influencia de los efectos de las variables independientes en la recuperación de oro

Fuente: (A. Azañero Ortiz, 2015)

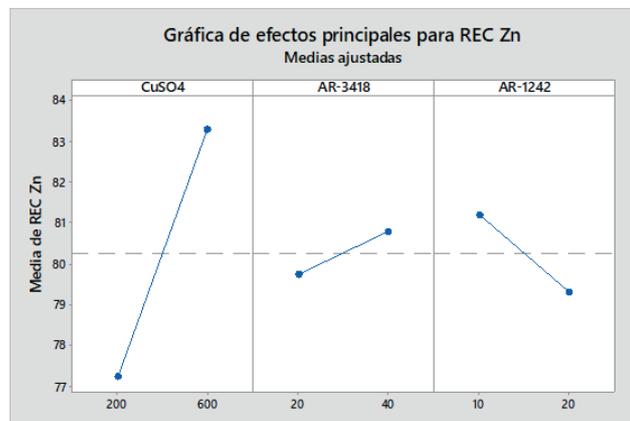


Figura 4. Influencia de los efectos de las variables independientes en la recuperación de zinc

Fuente: (A. Azañero Ortiz, 2015)

V. CONCLUSIONES

- La variable de mayor influencia para la recuperación de oro es el sulfato de cobre al 5%, con una contribución de 79.00%, seguido del AR-1242 con una contribución de 12.53%, tal como se observa en la Tabla 6.
- La ecuación ajustada para la recuperación de oro tiene un coeficiente de determinación pronosticado de 93.25%, tal como se observa en la Tabla 7, y es:

$$\text{Rec. Au} = 83.40 + 0.00600 \text{ CuSO}_4 + 0.110 \text{ AR-3418} + 0.035 \text{ AR-1242} + 0.000313 \text{ CuSO}_4 * \text{AR-3418} + 0.000275 \text{ CuSO}_4 * \text{AR-1242} - 0.00800 \text{ AR-3418} * \text{AR-1242} - 0.000011 \text{ CuSO}_4 * \text{AR-3418} * \text{AR-1242}.$$
- La variable de mayor influencia en la recuperación de zinc es la dosificación del reactivo sulfato de cobre al 5%, con una contribución de 83.61%, seguido del AR-1242, con 7.98% de influencia en el proceso, tal como se observa en la Tabla 9.
- La ecuación ajustada para la recuperación de zinc tiene un coeficiente de determinación pronosticado de 86.27%, tal como se observa en la Tabla 10, y es:

$$\text{Rec. Zn} = 73.14 + 0.0100 \text{ CuSO}_4 + 0.132 \text{ AR-3418} + 0.051 \text{ AR-1242} + 0.000164 \text{ CuSO}_4 * \text{AR-3418} + 0.000131 \text{ CuSO}_4 * \text{AR-1242} - 0.00811 \text{ AR-3418} * \text{AR-1242} - 0.000004 \text{ CuSO}_4 * \text{AR-3418} * \text{AR-1242}.$$

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección del Vicerrectorado de Investigación, que, a través del Consejo Superior de Investigaciones, se desarrolló la ejecución del proyecto sin financiamiento; cuyo código es: C17162131 del Grupo de Investigación; así mismo, a los estudiantes y docentes de las Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica.

VII. REFERENCIAS

- Azañero Ortiz, A. (2015). *Flotación y Concentración de Minerales*. E.A.P de Ingeniería Metalúrgica UNMSM. <https://es.scribd.com/document/421890180/FLOTACION-Y-CONCENTRACION-DE-MINERALES-ANGEL-AZANERO-ORTIZ-pdf>
- Azañero Ortiz, A., Aramburu Rojas, V., Quiñones Lavado, J., Puente Santibáñez, L., Cabrera Sandoval, M., Rengifo Sing, W., Falconi Rosadio, V., & de Dios Quispe Valdivia, J. (2010). Flotación de minerales polimetálicos sulfurados de Pb, Cu y Zn. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 13(26), 51–58. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v13i26.429>
- Azañero Ortiz, Á., Núñez Jara, P., & Aramburu Rojas, V. (2013). Influencia de los iones metálicos de Pb, Zn, As, Sb y Ag en la activación natural de la esfalerita durante la flotación

deplomo-plata. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 16(31), 34. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v16i31.11277>

- Cabala, J. M., Cabala, J. M., Cabala, J. M., & Cabala, J. M. (1990). *Procesamiento de minerales* (Primera edición). Sin editorial.
- Cabala, J. M., Cabala, J. M., Cabala, J. M., & Cabala, J. M. (2000). *Diseño Experimental* (1a ed.). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Chia, J., Chung Ching, A., Arce, G., Lovera, D., Arias, V., Puente, L., & Coronado, R. (2013). Optimización de variables en la flotación polimetálica utilizando MINITAB Proyecto Minero Hilarión-Milpo. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 16(31), 28. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v16i31.11276>
- Chumbez Diaz, G. S. (2019). Flotación del Zn marmatítica con alto contenido de pirrotita [Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. In *Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión*. <http://repositorio.unjpsc.edu.pe/handle/20.500.14067/3776>
- Gómez Bastar, S. (2012). *Metodología de la investigación* (1a ed.). <http://up-rid2.up.ac.pa:8080/xmlui/handle/123456789/2019>
- Gorain, B., Harris, M., Franzidis, J., & Manlapig, E. (1998). The effect of froth residence time on the kinetics of flotation. *Minerals Engineering*, 11(7), 627–638. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(98\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00047-8)
- Medina Beltran, O. (1982). *Flotación, Fundamento*. s.e. https://biblioteca.unap.edu.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=1508pdf;jsessionid=F8808726099CE5EE688871D58BE88FCC?sequence=1
- Silva, R.M. & Flores, M. (2005). *LA INTOXICACIÓN CRÓNICA POR MERCURIO COMO EFECTO NEGATIVO A DISTANCIA DE LA MINERÍA ALUVIAL EN LA POBLACIÓN URBANA DE CIUDAD DE PUERTO MALDONADO 2005*. Universidad Andina del Cusco. <http://mddconsortium.org/wp-content/uploads/2014/11/Silva-Maytano-2005-Intoxicacion-chronica-por-mercurio-en-la-poblacion-urbana-de-Puerto-Maldonado.pdf>
- SINIA. (2002). *Ley N° 27651 de formalización y promoción de la Pequeña Minería y Minería Artesanal*. Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-formalizacion-promocion-pequena-mineria-mineria-artesanal>
- Tovar Jumpa, O., Sánchez E., W., & García Alvarez, C. (2005). *Implementación y uso de la retorta en el proceso de refogado*. Dirección de Promoción y Desarrollo Minero-MINEM. <https://www.yumpu.com/es/document/read/12894702/implementacion-y-uso-de-la-retorta-en-el-proceso-de-refogado>
- Veiga, M. M., & Meech Ambio, J. A. (1995). Gold Mining Activities in the Amazon: Clean-Up Techniques and Remedial Procedures for Mercury Pollution. *Ambio*, 24(6), 371–375. <https://www.jstor.org/stable/4314369>
- Aramburú Rojas, V. S., Núñez, P., Azañero Ortiz, Á., Figueroa, M., & Gagliuffi, P. (2010). Recuperación de oro y mercurio de los relaves del proceso de amalgamación con tecnología limpia. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 13(25), 13–19. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v13i25.368>

Contribución de la Autoría

Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión, Validación (Vidal Aramburú Rojas y Marilú Calderón de Alvarado). Adquisición de fondos (Luis Gutiérrez Falcón). Curación de datos, Software, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición (Jorge Ortiz Barreto, Aldo Adama Navarro y Luis Quispe Gallegos).