

# Optimización mediante concentración gravimétrica centrífuga para recuperar oro residual en relaves de amalgamación en AMAR 3 de Mayo La Rinconada – Puno

## Optimization by centrifugal gravimetric concentration to recover residual gold in amalgamation tailings in AMAR 3 de Mayo La Rinconada – Puno

Zenón Quispe Arpasi<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Innovación en Ingeniería y Desarrollo Ambiental del Perú Sociedad de Responsabilidad Limitada. IIDA del Perú S.R.L., Correo: [zequia01@gmail.com](mailto:zequia01@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0998-562X>

### Resumen

La Optimización de la recuperación de oro residual en relaves de amalgamación mediante concentración gravimétrica centrífuga como alternativa técnica, el objetivo fue incrementar la eficiencia y reducir pérdidas de minerales. La metodología utilizada fue, el análisis mineralógico por microscopio electrónico de barrido (SEM) identificó hierro en óxidos, pirita, cuarzo, mercurio, wolframio y oro asociado al cuarzo. Análisis granulométrico post-remolienda, ajustado al modelo Rosin-Rammler, determinó que el 81,52 % del material pasó la malla N° 200 (75 µm), estableciendo una condición reológica y física favorable para el procesamiento gravimétrico. Mediante un diseño experimental factorial 2<sup>2</sup>, se realizaron cinco pruebas en un equipo Falcon L40 utilizando muestras de 5 000 g con una ley promedio de 9,733 g/t. Los resultados demostraron que la condición operativa óptima se alcanzó en la prueba P-Z4, empleando una fuerza centrífuga de 300 G's y una presión de agua de 4 psi, logrando recuperar el 58,371 % del oro residual, mientras el 41,29 % permaneció sin recuperar. El análisis estadístico confirmó que la variable de aceleración centrífuga (G's) tuvo una influencia determinante del 89,7 % en el desempeño del proceso. En conclusión, la implementación de la concentración gravimétrica centrífuga representa una alternativa técnica altamente viable para mejorar la recuperación aurífera en relaves de amalgamación. Esta tecnología no solo incrementa la productividad y sostenibilidad de la minería artesanal al maximizar el aprovechamiento del recurso, sino que también contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental al mitigar la dispersión de relaves con valores metálicos.

**Palabras clave:** Amalgamación, centrífuga, gravimetría, mercurio, minería artesanal y relaves

### Abstract

The optimization of the recovery of residual gold in amalgamation tailings by centrifugal gravimetric concentration as a technical alternative, the objective was to increase efficiency and reduce mineral losses. The methodology used was, mineralogical analysis by scanning electron microscope (SEM) identified iron in oxides, pyrite, quartz, mercury, tungsten and gold associated with quartz. Post-grinding granulometric analysis, adjusted to the Rosin-Rammler model, determined that 81.52 % of the material passed the No. 200 mesh (75 µm), establishing a rheological and physical condition favorable for gravimetric processing. Using a 2<sup>2</sup> factorial experimental design, five tests were performed on a Falcon L40 using 5 000 g samples with an average grade of 9.733 g/t. The results showed that the optimal operating condition was achieved in the P-Z4 test, using a centrifugal force of 300 G's and a water pressure of 4 psi, managing to recover 58.371% of the residual gold, while 41.29% remained unrecovered. The statistical analysis confirmed that the variable of centrifugal acceleration (G's) had a determining influence of 89.7% on the performance of the process. In conclusion, the implementation of centrifugal gravimetric concentration represents a highly viable technical alternative to improve gold recovery in amalgam tailings. This technology not only increases the productivity and sustainability of artisanal mining by maximizing the use of the resource, but also contributes significantly to the reduction of environmental impact by mitigating the dispersion of tailings with metallic values.

**Keywords:** Amalgamation, centrifugation, gravimetry, mercury, artisanal mining and tailings.

**Recibido:** 13/12/2024

**Aceptado:** 03/09/2025

**Publicado:** 30/12/2025

\*Autor para correspondencia: [zequia01@gmail.com](mailto:zequia01@gmail.com)

**Cómo citar:** Quispe Arpasi, Z. . (2025). Optimización mediante concentración gravimétrica centrífuga para recuperar oro residual en relaves de amalgamación en AMAR 3 de Mayo La Rinconada – Puno. Revista De Investigaciones, 14(4), 169-180. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i4.6556>

## Introducción

En Perú, particularmente en regiones como La Rinconada y Cerro Lunar, la extracción de oro se realiza mayoritariamente mediante métodos artesanales que han sido transmitidos a lo largo de generaciones. Estos métodos, aunque culturalmente arraigados, son ineficientes y generan significativas pérdidas de oro y mercurio (Kuramoto, 2001; Ahern, 2016). A pesar de su relevancia socioeconómica, estas técnicas presentan serias deficiencias en términos de recuperación del metal valioso (Lins et al., 1992).

En España el mercurio se extraía en Almadén, desde el año 415 a.C., utilizando esclavos y convictos, los romanos identificaron la intoxicación por mercurio en estos trabajadores (Jiménez, 2005). Los procesos tradicionales, que incluyen el uso de molinos y quimbaletes, a menudo dejan una cantidad significativa de metal y mercurio en los relaves de amalgamación (Blesa & Castro, 2015). Esta situación no solo conlleva pérdidas económicas para los mineros, sino que también contribuye a la contaminación ambiental, un problema crítico que ha captado la atención de organismos nacionales e internacionales (Velásquez et al., 2010).

La falta de resultados efectivos en la formalización y regulación de la minería artesanal en Perú, ha sido agravada por problemas de corrupción y cambios frecuentes en las políticas gubernamentales, complicando aún más el panorama (Vargas, 1995; Sánchez, 2018). Ante este desafío, la presente investigación propone la concentración gravimétrica centrífuga como una metodología potencial para mejorar la recuperación del oro en relaves de amalgamación (Elorza, 2020). Los principios de concentración gravimétrica separan minerales de diferente densidad relativa entre el mineral y ganga. Las diferencias en movimiento en respuesta a las acciones que ejercen sobre ellos simultáneamente la gravedad y otras fuerzas como la hidráulica y de fricción (López et al., 1999; Esquivel & Álvarez, 2020).

El objetivo del proyecto es optimizar el proceso de recuperación del oro residual en los relaves

de amalgamación de AMAR 3 de Mayo en La Rinconada, Puno (Rivera, 2017). Para lo cual se utilizó el concentrador gravimétrico Falcón Icon L40, diseñado para recuperar partículas finas de oro con alta eficiencia (Honaker & Forrest, 2003; Colan & Ocaña, 2023).

Esta investigación, también identifica el estado de liberación del oro residual, determina la granulometría de los relaves, y evaluar la influencia de variables operativas como la presión del agua y la fuerza de gravedad centrífuga en la recuperación del oro (Carrasco & Piminchumo, 2018; Gelhardt et al., 2021). Empleándose un microscopio electrónico de barrido (SEM) para analizar el estado de liberación del oro, seguido por análisis de mallas para determinar la granulometría adecuada, validada por el método matemático de Rosin – Rammler (Calderón, 2020; Cárdenas & Moya, 2022; Gómez, 2018) y complementando con diseño factorial en dos sentidos (Quevedo, 2006). Los resultados y discusiones sobre la eficiencia del método gravimétrico propuesto (Conejeros, 2003; Wills & Finch, 2015; Murphy, 2001; Melgarejo et al., 2010).

A través de este enfoque, se espera mejorar la recuperación del oro y reducir la contaminación en las áreas mineras, proporcionando una base sólida para futuras iniciativas que puedan transformar la minería artesanal en una actividad más sostenible y rentable (Martínez, 2004; Petruk, 2000; Veiga et al., 2009; Poloko, 2019)

## Métodos

### Ámbito o lugar de estudio

La investigación se ha llevado en AMAR 3 de Mayo, del centro poblado La Rinconada del distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina y región de Puno - Perú, en el flanco Oriental de la Cordillera de los Andes, cuya coordenada geográfica es:

Latitud Sur; 14° 37 '54, 34"

Longitud Oeste; 69° 26 '51, 80" (Figura 1).

**Figura 1**  
Mapa de ubicación



*Nota.* Ubicación de proyecto Ananea, San Antonio de Putina

## Descripción de métodos

La metodología de investigación para optimizar la recuperación de oro residual mediante concentración gravimétrica centrífuga en los relaves de amalgamación se basa en un enfoque cuantitativo y comprende tres etapas: microscopía para determinar el estado de liberación del oro y minerales asociados, análisis granulométrico para establecer la distribución de tamaños de partícula, y la realización de cinco pruebas de concentración centrífuga, cuyos parámetros operativos, se seleccionaron en función de las características del relave minero, las especificaciones del equipo y la evidencia técnica disponible, permitiendo así mejorar la eficiencia del proceso de recuperación.

### Microscopía para identificar el oro residual

En la investigación, se empleó el Thermo Scientific Scios Dual Beam FIB-SEM de la Universidad Nacional de Agustín de Arequipa para investigar relaves de amalgamación, equipado con un detector de electrones retro dispersados (T1) y un detector de Rayos X EDS, que permitió identificar el estado de liberación del oro residual y otros elementos presentes en la muestra.

La muestra de relaves (Concentrado), de color plomo y con granulometría de partículas finas de diversos tamaños, se preparó en pequeñas proporciones sobre Stubs de Aluminio utilizando cinta de carbón. Las imágenes se obtuvieron con el detector de electrones retro dispersados en alto vacío y a 1 kV de aceleración, generándose dos microfotografías acompañadas de un análisis elemental.

## Análisis granulométrico de relaves de amalgamación

Se realizó un análisis granulométrico por vía húmeda de 250 g de relaves de amalgamación, previamente sometidos a una remolienda en seco, utilizando mallas de distintos tamaños: 50 (300  $\mu\text{m}$ ), 70 (212  $\mu\text{m}$ ), 100 (150  $\mu\text{m}$ ), 140 (106  $\mu\text{m}$ ), 200 (75  $\mu\text{m}$ ) y -200 (-75  $\mu\text{m}$ ). El análisis correspondiente a la malla 200 (75  $\mu\text{m}$ ) arrojó una distribución del 81,52 %, conforme al modelo matemático R-R.

$$Fx = 100 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^m} \right]$$

O también:

$$Fx = 100 \left[ 1 - \exp \left[ -\left(\frac{x}{k}\right)^m \right] \right]$$

Donde: Fx en el % pasante, x es el tamaño de partícula, k es el módulo de tamaño, m es el módulo de distribución.

## Pruebas de concentración gravimétrica centrífuga

Para las pruebas de concentración gravimétrica centrífuga, se llevaron a cabo utilizando un concentrador gravimétrico centrífuga de tipo laboratorio Falcon L40. Para todas las pruebas establecidas, se prepara en un acondicionador de tipo laboratorio, bajo las siguientes condiciones: Peso de relaves de amalgamación de 5000 g, Ley de cabeza de 9,733 g/t, Malla -75  $\mu$  de 81,52 %. Tiempo de acondicionamiento de la pulpa de 10 min. Agua de 15 L, Porcentaje de sólidos de 25 %, flujo de alimentación de 3,5 – 4,0 L/min.

## Variables de operación según diseño experimental

Para determinar la influencia de las variables de operación en la recuperación del oro residual en relaves de amalgamación, se utilizó el diseño experimental factorial  $2^k$  (donde  $k = 2$ ), que considera 2 factores cada uno en dos niveles (mínimos y máximos). Este diseño factorial proporciona 4 combinaciones de niveles de factores

y permite identificar dos efectos principales. La elaboración de una ecuación estadística-matemática basada en este diseño facilita el control y la optimización del proceso de recuperación del oro residual. Las variables del proceso de operación consideradas en el estudio incluyen la presión del agua y la fuerza de gravedad y son: A es la presión de agua en (psi) y B es la Fuerza de gravedad en ( $G$ 's) (Tabla 1).

**Tabla 1**  
Factores y valores de niveles mínimos y máximos

| Código | Factores           | Unidad de medida | Niveles    |            | Recuperación(%) |
|--------|--------------------|------------------|------------|------------|-----------------|
|        |                    |                  | Mínimo (-) | Máximo (+) |                 |
| A      | Presión de agua    | psi              | 2          | 4          |                 |
| B      | Fuerza de gravedad | $G$ 's           | 20         | 300        |                 |

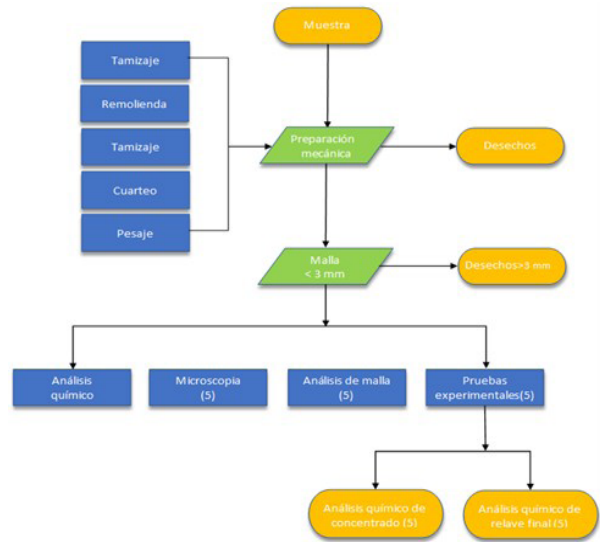
*Nota.* Proceso investigación

## Tratamiento de las muestras de relaves

Se estableció un procedimiento para la toma de muestras de relaves finales (5) y el lavado del cortador de flujo, el cual se llevó a cabo cada 10 segundos, este enfoque permitió garantizar la consistencia y precisión en la recolección de datos. Por otro lado, los concentrados obtenidos tras las pruebas experimentales fueron lavados, sedimentados con Magnafloc Catiónico, secados, pesados en una balanza electrónica de dos dígitos y posteriormente embolsados para su análisis químico, las muestras de relaves se sedimentaron, filtraron, secaron, homogenizaron, cuartearon y también se embolsaron para su análisis químico, las muestras de concentrados y relaves fueron debidamente codificadas.

Se detalla el diagrama de flujo experimental, iniciando con la toma de muestra, preparación mecánica, análisis químico, microscopía, pruebas experimentales, finalmente, con el análisis químico de los concentrados y relaves (Figura 2).

**Figura 2**  
Diagrama de flujo del proceso de investigación



*Nota.* Resultados obtenidos de información.

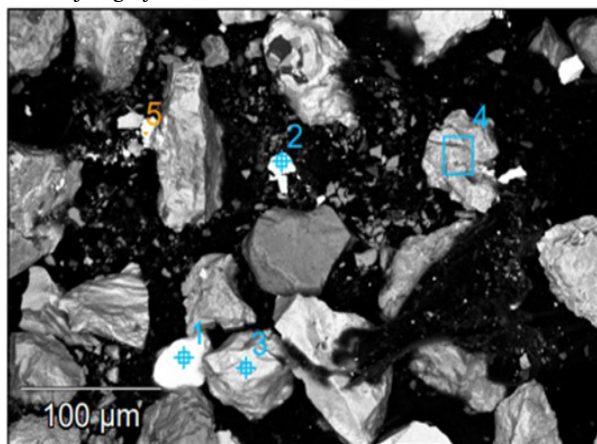
## Resultados y discusión

### Estado de liberación del oro residual

se identificó los componentes presentes de cinco puntos en la muestra donde los espectrogramas tienen una magnificación de 1000 x aumento. Las mismas que proporcionan una visión clara de la presencia y porcentaje de oro residual y otros componentes en los relaves (Figuras 3).

**Figura 3**

Microfotografía de la muestra de relave del concentrado



Nota. Project cme una eds zenon quispe (set. 2024).

Se identificó otros elementos presentes tales como: Punto 1, se encontraron pirita, óxidos de hierro, un alto porcentaje de wolframio y mercurio.

Punto 2, se detectaron bajas concentraciones de hierro, wolframio, arsénico y mercurio. Punto 3, la muestra contenía óxidos de hierro, pirita, arsénico y oro. Punto 4, se observaron óxidos de hierro, pirita, pequeñas cantidades de cobre, arsénico y mercurio. Punto 5, se encontró hierro, pirita, galio, oro y arsénico.

### Análisis granulométrico de los relaves

la muestra de revalos PCAB-8, de 250g, fue sometida

a una remolienda en seco para lograr una granulometría adecuada para el trabajo. Posteriormente, se realizó el análisis granulométrico utilizando tamices de la serie Taylor (5 mallas) y el proceso se llevó a cabo por vía húmeda para facilitar la clasificación del material.

### Distribución granulométrica

La validación de los resultados se realizó mediante el modelo matemático Rosin-Rammler (R-R), que permitió evaluar la distribución de tamaños de partículas (Tabla 2).

**Tabla 2**

Método Rosin-Rammler con remolienda

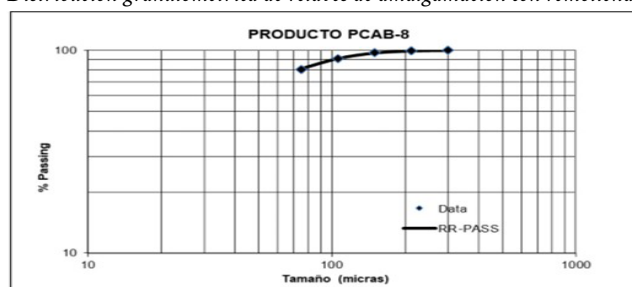
| Malla         | Abertura<br>ASTM<br>(µ) | Peso<br>(g)   | Peso<br>(%)   | Acumulado<br>(%) | Passing<br>(%) | Modelo<br>(R-R) |
|---------------|-------------------------|---------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|
| N° 50         | 300                     | 0,20          | 0,08          | 0,08             | 99,92          | 99,95           |
| N° 70         | 212                     | 0,90          | 0,36          | 0,44             | 99,56          | 99,43           |
| N° 100        | 150                     | 5,10          | 2,04          | 2,48             | 97,52          | 97,16           |
| N° 140        | 106                     | 15,60         | 6,24          | 8,72             | 91,28          | 91,38           |
| N° 200        | 75                      | 26,50         | 10,60         | 19,32            | 80,68          | 81,52           |
| N° -200       | -75                     | 201,70        | 80,68         | 100,00           | 0,00           |                 |
| <b>Total:</b> |                         | <b>250,00</b> | <b>100,00</b> |                  |                |                 |

Nota. Procedimientos y resultados obtenidos mediante el modelo matemático Rosin-Rammler (R-R).

Gráfico de validación de los resultados mediante el modelo matemático Rosin-Rammler (Figura 4).

**Figura 4**

Distribución granulométrica de relaves de amalgamación con remolienda



Nota. Validación mediante el modelo matemático Rosin-Rammler (R-R).



El modelo matemático Rosin-Rammler (R-R) se utilizó para correlacionar el porcentaje acumulado pasante con el tamaño de partícula o la abertura de malla de la serie empleada. En el análisis de los relaves tras la remolienda, el modelo reveló que el 81,52 % del material pasó a través de la malla número 200, que tiene una abertura de 75  $\mu\text{m}$  según la norma ASTM, basándose en una muestra de 250 g. Este resultado refleja una clasificación granulométrica eficiente del material después de la remolienda.

### Determinación de la influencia de variables de operación

**Tabla 3**  
Resultados de las pruebas experimentales

| N° Pruebas | Codificación | Variables Independientes |          | Variable Dependiente |                 | Variables Paramétricas |              |                          |
|------------|--------------|--------------------------|----------|----------------------|-----------------|------------------------|--------------|--------------------------|
|            |              | Presión                  | Gravedad | Presión (psi)        | Gravedad (G' s) | Recuperación Au (%)    | Ley Au (g/t) | Radio Conc. Radio Enriq. |
| 1          | PZ-1         | -1                       | -1       | 2                    | 20              | 47,23                  | 846,25       | 165,02 78,07             |
| 2          | PZ-2         | 1                        | -1       | 4                    | 20              | 45,55                  | 2535,688     | 485,44 221,26            |
| 3          | PZ-3         | -1                       | 1        | 2                    | 300             | 57,76                  | 373,200      | 54,00 31,15              |
| 4          | PZ-4         | 1                        | 1        | 4                    | 300             | 58,71                  | 357,350      | 59,52 34,97              |
| 5          | PZ-5         | 0                        | 0        | 3                    | 160             | 56,54                  | 462,000      | 66,84 37,75              |

**Nota.** Resultados de varianza (ANOVA)

En el proceso de concentración gravimétrica centrífuga realizado en el equipo Falcón L40, se trabajó inicialmente con una muestra de relaves de amalgamación que presentaba una ley de cabeza de 9,733 g/t, equivalente al 100 % del contenido de oro. Tras la ejecución de cinco pruebas, la mayor recuperación se logró en la prueba 4, alcanzando un 58,71 %. Este resultado se obtuvo aplicando una fuerza centrífuga de 300 G' s y una presión de agua de 4 psi, demostrando que estos factores son determinantes en el proceso de recuperación de oro.

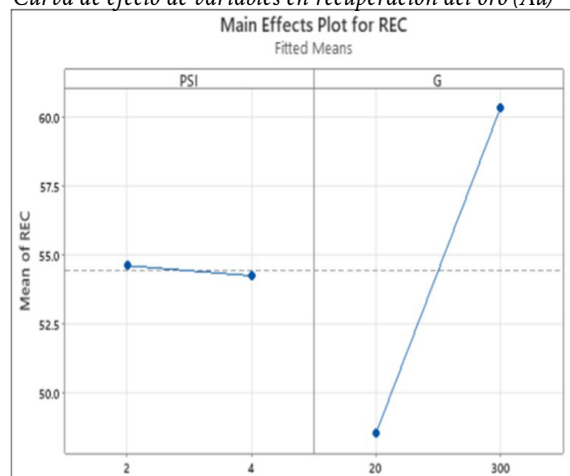
Sin embargo, en los relaves finales aún quedó un 41,29 % del oro, lo que se atribuye principalmente a la presencia de sulfuros primarios, los cuales dificultan la extracción completa del metal.

Con relación al uso de agua de fluidización, los resultados mostraron que este factor no tiene una influencia significativa en la recuperación del oro. Según los datos presentados la mayor recuperación

Se llevó a cabo un estudio para determinar la influencia de las variables de operación en la concentración gravimétrica centrífuga en el Falcón L40, con el objetivo de mejorar la recuperación del oro residual en los relaves de amalgamación de 3 de Mayo, La Rinconada, Puno. Los resultados obtenidos de las pruebas experimentales fueron analizados mediante Software Minitab y validados mediante un análisis estadístico de varianza (ANOVA) de dos factores, lo que permitió optimizar el proceso y comprender mejor la interacción entre las variables involucradas (Tabla 3).

de oro bajo una fuerza gravitacional de 200 G' s se logró con una presión de agua de fluidización de 3 psi, lo que se traduce en un caudal de 7 L/min (Figura 5).

**Figura 5**  
Curva de efecto de variables en recuperación del oro (Au)

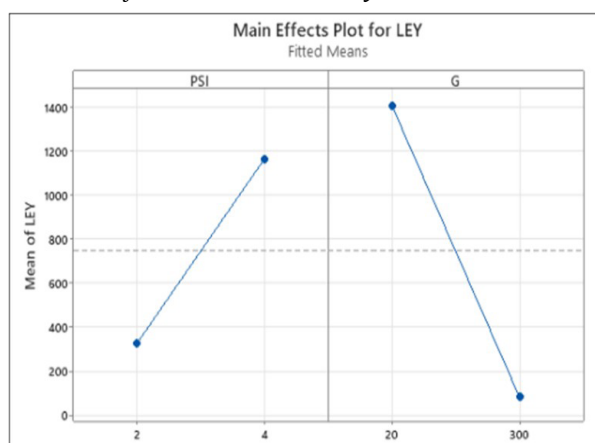


**Nota.** Resultados de relación al uso de agua.

**Según las leyes del concentrado**

Las mejores leyes están fuertemente influenciadas por una baja fuerza de gravedad y una alta tasa de agua de fluidización. Las condiciones óptimas se alcanzaron con una fuerza de gravedad de 20 G' s y una presión de agua de 4 psi, lo que corresponde a un caudal de 7,44 L/min, logrando una ley de 2535,688 g/t. (Figura 6).

**Figura 6**  
Curva de efectos de variable en la ley del oro (Au)



**Nota.** Resultados de datos.

### Según radio de concentración

Se puede concluir que, al aplicar una baja fuerza de gravedad de 20 G' s y un alto flujo de agua de fluidización de 4 psi, se logra un radio de concentración de 485,44.

### Según radio de enriquecimiento

Los altos radios de enriquecimiento se producen en la zona de baja fuerza de gravedad, a 20 G' s, y con un alto flujo de agua de fluidización de 4 psi, logrando radios de enriquecimiento que superan 221,15.

## Estadística inferencial para pruebas experimentales

**Tabla 4**  
Análisis de Varianza (ANOVA)

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F     | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------|--------------|----------------------|
| Filas                     | 28397,401         | 4                  | 7099,350                  | 1,132 | 0,407        | 3,838                |
| Columnas                  | 64300,063         | 2                  | 32150,032                 | 5,127 | 0,037        | 4,459                |
| Error                     | 50163,063         | 8                  | 6270,383                  |       |              |                      |
| <b>Total</b>              | <b>142860,527</b> | <b>14</b>          | <b>87</b>                 |       |              |                      |

**Nota.** Resultados de análisis de varianza.

### Prueba de hipótesis general

Ha: La optimización mediante concentración gravimétrica centrífuga mejora significativamente la recuperación del oro residual en relaves de amalgamación en AMAR 3 de Mayo La Rinconada – Puno.

Ho: La optimización mediante concentración gravimétrica centrífuga no mejora la recuperación del oro residual en relaves de amalgamación en AMAR 3 de mayo La Rinconada – Puno.

### Prueba de hipótesis estadística

Ha:  $PZ - 01 \neq PZ - 02 \neq PZ - 03 \neq PZ - 04 \neq PZ - 05$ .

Ho:  $PZ - 01 = PZ - 02 = PZ - 03 = PZ - 04 = PZ - 05$ .

De acuerdo con el análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo, se observa que, en promedio, los niveles de presión de agua de fluidización son de 3 psi y la fuerza de gravedad centrífuga alcanza un promedio de 160 G' s. En este contexto, la recuperación de oro presenta un promedio de 53,158 puntos porcentuales.

El análisis de varianza muestra un valor de probabilidad de error de 0,037, lo que indica que existen diferencias significativas entre las cinco pruebas realizadas. La mejor prueba fue la PZ-4, con una recuperación máxima de oro del 58,71 %, influenciada por el aumento de la fuerza de gravedad centrífuga, alcanzando la mayor recuperación con 300 G' s. Además, se utilizaron 4 niveles de presión de agua de fluidización (psi). Estos resultados permiten aceptar la hipótesis de investigación, la cual establece que la optimización mediante concentración gravimétrica centrífuga mejora significativamente la recuperación del oro residual en los relaves de amalgamación en AMAR 3 de Mayo, La Rinconada – Puno (Tabla 4).

### Hipótesis específicas

Ha: Las variables de operación mediante concentración gravimétrica centrífuga influyen en la recuperación de oro residual en relaves de amalgamación en AMAR 3 de mayo La Rinconada – Puno.

Ho: Las variables de operación mediante concentración gravimétrica centrífuga no influye en la recuperación de oro residual en relaves de amalgamación en AMAR 3 de Mayo La Rinconada – Puno.

Las pruebas de regresión muestran que el coeficiente de correlación múltiple indica una correlación fuerte, donde un aumento en la fuerza de gravedad mejora la recuperación de oro. En particular, con una fuerza de 300 G' s, la recuperación de oro alcanza el 58,71 %. Además, el coeficiente de determinación  $R^2$  señala que la fuerza de gravedad influye en un 89,7 % en la recuperación del oro.

El modelo de regresión fue alta correlación 0,947; el valor de  $R^2$  elevado 0,897, lo que significa que casi

el 90 % de la variabilidad está explicada. El valor de  $R^2$  ajustado fue de 0,862 confirma que el modelo es robusto y el error típico moderado de 2,321; lo que indica cierta dispersión, pero aceptable (Tabla 5).

**Tabla 5**  
Estadísticas de la regresión

| Estadísticas de la regresión        |       |
|-------------------------------------|-------|
| Coeficiente de correlación múltiple | 0,947 |
| Coeficiente de determinación $R^2$  | 0,897 |
| $R^2$ ajustado                      | 0,862 |
| Error típico                        | 2,321 |
| Observaciones                       | 0,947 |

*Nota.* Resultados de estadísticas

El análisis de varianza muestra un valor de probabilidad de error de 0,015, menor al parámetro de 0,05, lo que demuestra que el modelo de regresión es válido. Las variables de presión del agua (psi) y fuerza de gravedad (G' s) se identifican como factores importantes en la recuperación de oro (Tabla 6).

**Tabla 6**  
Análisis de varianza

|              | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los Cuadrados | F      | Valor crítico de F |
|--------------|--------------------|-------------------|---------------------------|--------|--------------------|
| Regresión    | 1                  | 140,304           | 140,304                   | 26,047 | 0,015              |
| Residuos     | 3                  | 16,160            | 5,387                     |        |                    |
| <b>Total</b> | <b>4</b>           | <b>156,464</b>    |                           |        |                    |

*Nota.* Resultados de Análisis de varianza

El mejor modelo de regresión es:

$$Au (\%) = 46,389 + 0,042 (G' s)$$

Donde la variable dependiente es la recuperación de Au (%) y la variable independiente en la fuerza de gravedad (G' s).

Se infiere que por cada incremento en un punto en la fuerza de gravedad (G' s), la recuperación de oro aumenta en 0,042 puntos porcentuales, Esto permite aceptar la hipótesis alterna, que establece que las variables operativas, mediante concentración gravimétrica centrífuga, influyen significativamente en la recuperación de oro residual en los relaves de amalgamación en AMAR 3 de Mayo, La Rinconada – Puno (Tabla 7).



**Tabla 7**  
*Modelo de regresión*

|                    | <b>Coefficientes</b> | <b>Error típico</b> | <b>Estadístico t</b> | <b>Probabilidad</b> | <b>Inferior (95 %)</b> | <b>Superior (95 %)</b> |
|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| Intercepción       | 46,389               | 1,684               | 27,545               | 0,000               | 41,030                 | 51,749                 |
| Fuerza             |                      |                     |                      |                     |                        |                        |
| de Gravedad (G 's) | 0,042                | 0,008               | 5,104                | 0,015               | 0,016                  | 0,069                  |

*Fuente.* Resultados de información procesada.

## Discusión

Se presentaron los análisis microscópicos elementales puntuales, destacan los puntos 3 y 5, donde se evidencia la presencia de oro y otros minerales en los relaves de amalgamación, lo que sugiere su coexistencia con componentes que afectan la recuperación metalúrgica. En este sentido, Escalante y Lovera (2023), mediante microscopía electrónica de barrido, reportan que el oro se encuentra ocluido en pirita y otros minerales sulfurados. Asimismo, las pruebas realizadas con el equipo Falcon C lograron una recuperación del 60 % para el oro y del 20,92 % para la plata, con leyes de 3,96 % de oro y 11,46 % de plata.

Respecto al análisis granulométrico de los relaves después de la remolienda, el modelo matemático de Rosin-Rammler determinó que el 81,52 % del material pasó por la malla número 200 (75  $\mu\text{m}$ , según la norma ASTM), a partir de una muestra de 250 g. De manera comparable, Julca y Ortiz (2017), reportaron que, utilizando un concentrador Falcon, alcanzaron una granulometría del 67,80 % a -200 malla, obteniendo una ley de concentrado de 16,20 g/t, una recuperación del 57,04 % y un radio de concentración de 41,60; posteriormente, realizaron pruebas de flotación sobre los relaves de la gravimetría.

En el estudio, el proceso de concentración gravimétrica centrífuga con el equipo Falcon L40, utilizando una muestra de relaves de amalgamación con una ley de 9,733 g/t de oro, permitió alcanzar una recuperación del 58,71 % en la prueba 4. Sin embargo, permaneció un 41,29 % de oro en los relaves finales, atribuible principalmente a la presencia de sulfuros primarios. Este resultado se

obtuvo aplicando una fuerza centrífuga de 300 G y una presión de agua de 4 psi.

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Carrasco y Piminchumo (2018), quienes analizaron un mineral aurífero similar de Cajabamba, Cajamarca, con una ley de 8,25 g/t de oro y 67 % de carbono, evaluando un pretratamiento mediante concentración gravimétrica centrífuga con un equipo Falcon Icon i150. Al variar la presión de agua y la fuerza centrífuga, observaron que el incremento de ambos parámetros mejoró la recuperación de oro, alcanzando un máximo de 57,94 % a 9 psi y 150 G, y un mínimo de 13,94 % a 5 psi y 80 G.

## Conclusiones

La investigación con el Microscopio Electrónico de Barrido Thermo Scientific Scios Dual Beam FIB-SEM permitió identificar la liberación del oro residual en la muestra de relaves de amalgamación, así como la presencia de diversos elementos y minerales. Se observó la coexistencia de Fierro en óxidos, Pirita, Cuarzo con Sodio, Aluminio y Magnesio, junto con la presencia de Manganeseo. La detección de Oro en asociación con Cuarzo y Mercurio, además de Wolframio y Otros elementos.

En el análisis granulométrico de los relaves de amalgamación, tras la remolienda, el modelo Rosin - Rammler reveló que el 81,52 % del material pasó a través de la malla número 200, que tiene una abertura de 75  $\mu\text{m}$  según la norma ASTM, basándose en una muestra de 250 g. Este resultado refleja una clasificación granulométrica eficiente del material después de la remolienda.

La recuperación de oro residual en los relaves de amalgamación de AMAR 3 de Mayo, La Rinconada-Puno, con una ley de 9,733 g/t, está fuertemente condicionada por la fuerza gravitacional aplicada en la concentración centrífuga. Utilizando una presión de agua de 4 psi y una fuerza de gravedad de 300 G's, se alcanzó una recuperación del 58,371 % de oro, con una influencia significativa del 89,7 % de estas variables en el proceso. Sin embargo, el 41,29 % del oro permaneció en los relaves finales, debido a la presencia de sulfuros primarios, que dificultan la extracción. El análisis de varianza ( $p = 0,015$ ), siendo menor al valor de referencia de 0,05, lo que confirma la validez del modelo de regresión, resaltando la importancia de la presión de agua y la fuerza gravitacional como factores claves para optimizar el proceso de recuperación.

## Agradecimientos

Agradezco a la empresa Innovación en Ingeniería y Desarrollo Ambiental del Perú Sociedad de Responsabilidad Limitada (IIDA DEL PERU SRL) por su apoyo en el aspecto logístico, que resultó fundamental para la realización de este proyecto.

## Referencias

- Ahern, N. (2016). Mercury in gold processing. En *Extractive metallurgy of gold and silver* (pp. 753–766). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00042-6>
- Blesa, M. A., & Castro, G. (2015). *Historia natural y cultural del mercurio* (1ª ed.). Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC). [http://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2017/10/libro\\_historia\\_natural\\_cultural\\_mercurio.pdf](http://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2017/10/libro_historia_natural_cultural_mercurio.pdf)
- Calderón, H. (2020). Microscopía electrónica de transmisión para observar átomos: principios y desarrollo. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 13(25), 133–156. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.25.69649>
- Cárdenas, L., & Moya, A. (2022). *Análisis granulométrico de agregados grueso y fino*. [Tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia]. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/82ff1cf8-bb70-4905-b482-0137de0b306d/content>
- Carrasco, C., & Piminchumo, K. (2018). *Influencia de la presión de agua y la fuerza de gravedad centrífuga en la recuperación de oro mediante concentración gravimétrica centrífuga para un mineral tipo antracita procedente de la Provincia de Cajabamba* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1fcc7eb9-bfe3-4d0d-9de3-8293007d1c6d/content>
- Colan, T., & Ocaña, E. (2023). *Evaluación para la recuperación de oro a partir de los relaves de amalgamación mediante procesos de gravimetría y lixiviación de la minería artesanal en la zona de Huarochiri-Lima* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/f0543ca4-146f-471e-bcef-f403833dc9d6/content>
- Conejeros, V. (2003). *Procesamiento de minerales*. Universidad Católica del Norte. [https://www.academia.edu/36845538/Procesamiento\\_de\\_minerales\\_V\\_Conejeros](https://www.academia.edu/36845538/Procesamiento_de_minerales_V_Conejeros)
- Elorza Rodríguez, E. (2020). *Concentración gravimétrica*. Academia.edu. [https://www.academia.edu/44567687/CONCENTRACIÓN\\_GRAVIMÉTRICA](https://www.academia.edu/44567687/CONCENTRACIÓN_GRAVIMÉTRICA)
- Escalante, J., & Lovera, D. (2023). Geometalurgia aplicada a relaves auríferos cianurados en la región Arequipa y su posterior proceso por Gravimetría. *Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geogr. Vol.* 26(51), 1–8. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.24969>
- Esquivel, E., & Álvarez, A. (2020). *Análisis económico conceptual del aprovechamiento de un depósito de relaves con contenido de oro mediante un proceso de concentración gravimétrico* [Tesis de posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/17258/YAURI\\_ESQUIVEL\\_ERICK\\_ANALISIS\\_ECONOMICO\\_CONCEPTUAL.pdf?sequence=1](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/17258/YAURI_ESQUIVEL_ERICK_ANALISIS_ECONOMICO_CONCEPTUAL.pdf?sequence=1)

- Gelhardt, L., Kuch, B., Dittmer, U., & Welker, A. (2021). Granulometric distribution of metals in road-deposited sediments by using different sieving methods. *Environmental Advances*, 5(1), 1–40. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100094>
- Gómez, G. (2018). El microscopio: fundamentos para su uso. In *Procedimientos-Para-El-Estudio-De-Moscas*. <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/1467>
- Honaker, R., & Forrest, W. (2003). *Advances in Gravity Concentration*. Society for Mining.
- Jiménez, A. (2005). *Interacción del mercurio con los componentes de las aguas residuales* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2754>
- Julca, D., & Ortiz, J. (2017). *Recuperación de oro en minerales sulfurados de baja ley en la provincia de Casma* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/6475>
- Kuramoto, J. (2001). *La Minería Artesanal e Informal en el Perú*. <https://www.iied.org/sites/default/files/pdfs/migrate/G00731.pdf>
- Lins, C. F. F., Veigat, M. M., Stewartt, J. A., Papaliai, A., & Papaliat, R. (1992). Performance of a new centrifuge (Falcon) in concentrating A gold ore from texada island, b.c., Canada. *Minerals Engineering*, 5(10), 1113–1121. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875\(92\)90153-Z](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875(92)90153-Z)
- López, A., Ibarra, A., Oliva, S., & Reyes, J. (1999). *Concentración gravimétrica centrifuga de oro y plata. Su implementación en el circuito de molienda de minera el pilón*. <https://www.researchgate.net/publication/326493725>
- Martínez, X. (2004). *El mercurio como contaminante global: Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente*. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3174/xgm1de1.pdf>
- Melgarejo, J., Proenza, J., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1–23. <https://doi.org/10.18268/BSGM2010v62n1a1>
- Murphy, D. (2001). *Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging* (Primera). Wiley-Liss. <https://www.amazon.com/-/es/Douglas-B-Murphy/dp/047125391X>
- Petruck, W. (2000). *Applied mineralogy related to gold*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-044450077-9/50008-0>
- Poloko, N. (2019). Physical separation methods, Part 1: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 641(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/641/1/012023>
- Quevedo, H. (2006). *Métodos estadísticos para la ingeniería ambiental y la ciencia* (Primera). Universidad Autónoma de CD. Juárez-. <https://es.scribd.com/document/376052751/Metodos-Estadisticos-Para-La-Ingenieria-Ambiental-y-La-Ciencia-Dr-Hector-Adolfo-Quevedo-Urias>
- Rivera, S. (2017). *Optimización de concentración gravimétrica de oro en la mesa vibratoria de la mina "Vicentina"* [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/7028/1/12976.pdf>
- Sánchez, I. (2018). *Técnicas Alternativas para la Extracción de Oro sin el Uso de Mercurio y su Potencial Aplicación a Pequeña Escala y Minería Artesanal en Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://repositorio.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/21703/1015399246.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas Gallardo, J. (1995). *Metalurgia del oro y la plata* (2ª ed.). Editorial San Marcos. [https://biblioteca.unasam.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=16777&shelfbrowse\\_itemnumber=20232](https://biblioteca.unasam.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=16777&shelfbrowse_itemnumber=20232)

- Veiga, M., Nunes, D., Klein, B., Shandro, J., Velásquez, C., & Sousa, R. (2009). Mill leaching: a viable substitute for mercury amalgamation in the artisanal gold mining sector? *Journal of Cleaner Production*, 17(15), 1373–1381. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.03.012>
- Velásquez, P., Veiga, M., & Hall, K. (2010). Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 18(3), 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.010>
- Wills, B., & Finch, J. (2015). *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (Octava). Elsevier Science & Technology Books. <https://shop.elsevier.com/books/wills-mineral-processing-technology/wills/978-0-08-097053-0>

