

Artículo de Investigación

# Aplicación de la Economía Circular en la Industria Metalúrgica Minera para la Recuperación de oro y la Producción de Ladrillos a partir de Relaves

## Application of the Circular Economy in the Mining Metallurgical Industry for the Recovery of Gold and the Production of Bricks from Tailings

Edwilde Yoplac Castromonte<sup>1</sup>: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

[eyoplacc@uni.edu.pe](mailto:eyoplacc@uni.edu.pe)

Orfelinda Avalo Cortez: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

[oavalo@uni.edu.pe](mailto:oavalo@uni.edu.pe)

David Pedro Martínez Aguilar: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

[dmartinez@uni.edu.pe](mailto:dmartinez@uni.edu.pe)

Julio Uza Teruya: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

[juza@uni.edu.pe](mailto:juza@uni.edu.pe)

Kevin Javier Sierra Redhead: Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

[kevin.sierra.r@uni.pe](mailto:kevin.sierra.r@uni.pe)

Fecha de Recepción: 27/05/2024

Fecha de Aceptación: 09/08/2024

Fecha de Publicación: 09/10/2024

### Cómo citar el artículo

Yoplac Castromonte, E., Avalo Cortez, O., Martínez Aguilar, D. P., Uza Teruya, J. y Sierra Redhead, K. J. (2024). Aplicación de la Economía Circular en la Industria Metalúrgica Minera para la Recuperación de oro y la Producción de Ladrillos a partir de Relaves [Application of the Circular Economy in the Mining Metallurgical Industry for the Recovery of Gold and the Production of Bricks from Tailings]. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 01-20. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-1085>

<sup>1</sup> Autor Correspondiente: Edwilde Yoplac Castromonte. Universidad Nacional de Ingeniería y (Perú).

**Resumen:**

**Introducción:** Los relaves mineros son desechos tóxicos que generan riesgos ambientales al exponerse al agua y oxígeno. Este estudio evalúa el uso de relaves de oro para recuperar oro y producir ladrillos, aplicando un enfoque de economía circular. **Metodología:** Se caracterizó la muestra para determinar las especies minerales y propiedades. Luego se realizaron pruebas de flotación en los relaves. **Resultados:** La caracterización de los relaves de Marañón reveló altas concentraciones de oro en arsenopirita, con el 90% del oro y plata en partículas menores de 74  $\mu\text{m}$ . La arsenopirita en este tamaño fino puede dañar el medio ambiente por su toxicidad. **Discusión:** El método ofrece una ventaja al reducir el volumen de relaves mediante la fabricación de ladrillos, además de productos ornamentales fabricados con cemento y silicato de sodio a temperatura ambiente. **Conclusiones:** La economía circular aplicada a la gestión de relaves en minería ha mostrado beneficios ambientales y económicos. Se reduce la generación de residuos y se recuperan materiales valiosos como oro y plata. Además, los relaves tratados pueden reutilizarse en la fabricación de ladrillos sin causar impactos ambientales.

**Palabras clave:** Relaves mineros; flotación; arsenopirita; oro; pirita; economía circular; caracterización; ladrillos.

**Abstract:**

**Introduction:** Mine tailings are toxic wastes that generate environmental risks when exposed to water and oxygen. This study evaluates the use of gold tailings to recover gold and produce bricks, applying a circular economy approach. **Methodology:** The sample was characterized to determine the mineral species and properties. Flotation tests were then performed on the tailings. **Results:** Characterization of the Marañón tailings revealed high concentrations of gold in arsenopyrite, with 90% of the gold and silver in particles smaller than 74  $\mu\text{m}$ . Arsenopyrite at this fine size can damage the environment due to its toxicity. **Discussion:** The method offers an advantage in reducing the volume of tailings by making bricks, in addition to ornamental products made with cement and sodium silicate at room temperature. **Conclusions:** Circular economy applied to tailings management in mining has shown environmental and economic benefits. Waste generation is reduced and valuable materials such as gold and silver are recovered. In addition, treated tailings can be reused in the manufacture of bricks without causing environmental impacts.

**Keywords:** Mining tailings; flotation; arsenopyrite; gold; pyrite; circular economy; characterization; bricks.

## 1. Introducción

En el Perú la minería es la más grande actividad económica aportando un porcentaje considerable al Producto Bruto Interno nacional. Sin embargo, el proceso de esta actividad evidencia diversos conflictos socioambientales. La generación de residuos mineros o expresados como relaves mineros provenientes de los diversos procesos es una amenaza latente que afecta las esferas del desarrollo sostenible (Torres *et al.*, 2024).

Para lograr la sostenibilidad ambiental la industria minera se enfrenta a importantes desafíos, tales como uso del agua, gestión de residuos y seguridad de las presas. Las instalaciones de almacenamiento de relaves representan los mayores sumideros de agua en las operaciones mineras. La mala gestión del contenido de agua en los relaves puede comprometer su estabilidad, lo que puede provocar posibles fallas de las presas y catástrofes ambientales. En respuesta a estos desafíos apremiantes, la industria minera recurre cada vez más a soluciones innovadoras, como la deshidratación de relaves y las estrategias de reutilización/reciclaje de agua para promover el desarrollo sostenible (Hamraoui *et al.*, 2024).

La economía circular es un enfoque económico y sistémico que busca optimizar el uso de los recursos, minimizar la generación de residuos y promover la sostenibilidad. A diferencia del modelo lineal de producción y consumo tradicional, en el cual los recursos se extraen, se utilizan y se descartan, la economía circular busca cerrar los ciclos de materiales y energía, manteniendo los productos, componentes y materiales en uso durante el mayor tiempo posible (Huerta *et al.*, 2021).

Se busca maximizar la eficiencia en el uso de los recursos, evitando la generación de residuos y reduciendo al mínimo la extracción de nuevos recursos. Esto implica la reutilización, el reciclaje y la valorización de los materiales y productos al final de su vida útil, de manera que puedan convertirse en recursos para otros procesos productivos (Huerta *et al.*, 2021).

Dentro de lo que es la minería, específicamente lo que es el procesamiento de minerales y/o en algún proceso hidrometalúrgico se generan relaves y en un gran volumen, ya que el principal objetivo de estos procesos es recuperar los compuestos valiosos que se encuentran en pequeñas cantidades mediante concentrados y/o metal. Los relaves mineros representan una cantidad significativa de residuos generados por la industria minera, lo que plantea desafíos ambientales y de sostenibilidad. Los relaves pueden contener minerales valiosos que no se han recuperado durante el proceso de extracción inicial. Aplicar la economía circular en el tratamiento de relaves, permite la recuperación de estos recursos, lo que puede tener un impacto económico positivo y reducir los riesgos ambientales asociados, como la contaminación de suelos y aguas subterráneas. La economía circular promueve enfoques más sostenibles para el manejo de los relaves (Zamora *et al.*, 2019).

El objetivo de este trabajo es analizar los desafíos y problemáticas asociadas al tratamiento de relaves en la industria minera y proporcionar recomendaciones y propuestas para la implementación efectiva de estrategias de economía circular en el tratamiento de relaves en la industria minera. En el caso específico de este trabajo se hará:

- Recuperar valores de los relaves de Poderosa
- Minimizar el Impacto ambiental
- Generar productos a comercializar

### ***1.1. Conceptos de economía circular y relaves mineros***

- La economía circular es un enfoque económico que busca optimizar el uso de los recursos a través de la reducción, reutilización, reciclaje y valorización de los productos, materiales y recursos en lugar de desecharlos después de su uso. Se basa en cerrar los ciclos de materiales y energía, minimizando la generación de residuos y promoviendo la sostenibilidad.
- Los relaves mineros son los residuos que se generan durante el procesamiento de minerales en la industria minera. Estos residuos son resultado de la separación y concentración de los minerales de interés mediante procesos físicos y químicos. Los relaves generalmente contienen una mezcla de agua y partículas finas de roca, minerales de poco valor económico y sustancias químicas utilizadas en el proceso de extracción.

## ***1.2. Desafíos y problemáticas asociadas al tratamiento de relaves en la minería***

El tratamiento de relaves en la minería presenta diversos desafíos y problemáticas, entre los que se pueden destacar que:

- Los relaves pueden contener minerales de valor económico que no se recuperaron durante el proceso de extracción inicial.
- Los relaves pueden contener sustancias químicas tóxicas y metales pesados que pueden contaminar el suelo, el agua y los ecosistemas circundantes si no se manejan adecuadamente. Esto puede tener un impacto negativo en la calidad del agua y la biodiversidad (MEND, 1991).
- Se han estudiado técnicas de caracterización de los relaves para identificar componentes valiosos y desarrollar procesos de separación y recuperación. Además, se ha explorado el uso de los relaves como materia prima en la producción de materiales de construcción (ladrillos y productos ornamentales) o como relleno en actividades de restauración de áreas mineras (Perales *et al.*, 2021).

## **2. Metodología**

### ***2.1. Descripción de la metodología utilizada para el estudio***

Los criterios a tomar en cuenta, son la viabilidad técnica, la reducción de residuos, la recuperación de metales valiosos, la minimización del impacto ambiental y la aceptación social.

### ***2.2. Explicación de los criterios de selección de las estrategias de economía circular aplicadas al tratamiento de relaves en la minería***

Desde el punto de vista técnico se tomó la concentración por flotación como lo más viable para recuperar los elementos valiosos (Ojeda *et al.*, 2006) y a la vez minimizar los compuestos en el relave final para evitar la posible acidez que genere este relave y a la vez que nos sirva para la fabricación de ladrillos para la Industria de la Construcción (Perales *et al.*, 2021).

### ***2.3. Descripción de los indicadores utilizados para evaluar la eficacia y eficiencia de las estrategias seleccionadas***

- En este caso se tomó como eficacia de la estrategia la recuperación de los metales presentes en los relaves. Una alta tasa de recuperación indica una estrategia eficiente (Kiventerä *et al.*, 2018).
- Un bajo contenido de elementos tóxicos en el relave del relave nos indica una buena eficacia desde el punto de vista ambiental y en la fabricación de ladrillos.

## 2.4. Aplicación de la Flotación al tratamiento de relaves en la minería

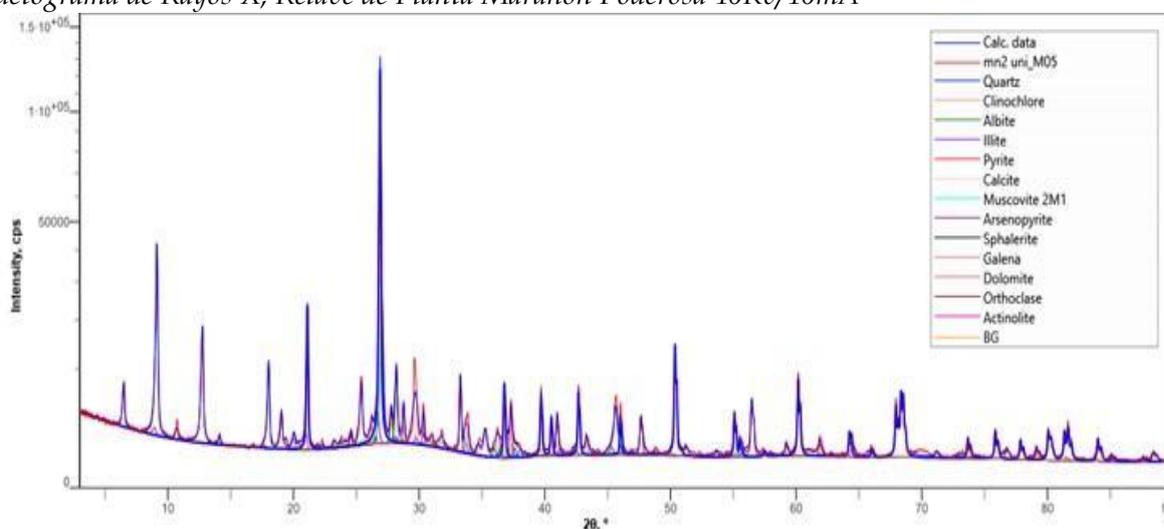
### 2.4.1. Caracterización del relave de cianuración de la Planta Marañón de Cia. Poderosa

La caracterización mineralógica del relave de la Planta Marañón y su composición se determinó mediante la Difracción de Rayos-X, DRX, los que se realizaron en el Laboratorio de la Compañía Minera Poderosa, cuyos resultados se pueden observar en la figura 1 y tabla 1.

Se puede observar que el relave de la Planta Marañón de la Compañía Minera Poderosa contiene 52,07% de Cuarzo,  $\text{SiO}_2$ ; 11,79% de Clinocloro,  $(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ; 9,42% de Albita,  $\text{AlNaO}_8\text{Si}_3$ ; 9,20% de Illite,  $\text{Al}_2\text{HKO}_{12}\text{Si}_4$ ; 5,69% de Pirita,  $\text{FeS}_2$ ; 3,63% de Calcita,  $\text{CaCO}_3$ , 2,93% de Muscovita,  $\text{K}(\text{Al}_{1,88}\text{Fe}_{12})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ; 2,14% de Arsenopirita,  $\text{AsFeS}$ ; 1,72% de Esfalerita,  $(\text{Zn,Fe})\text{S}$ ; mientras que la Galena, Dolomita, Ortoclasa y Actinolita tienen porcentajes muy pequeños.

**Figura 1.**

*Difractograma de Rayos X, Relave de Planta Marañón Poderosa 40Kv/40mA*



**Fuente:** Laboratorio de la Compañía Minera Poderosa.

**Tabla 1.**

*Fases y composición del relave de la Planta Marañón de Poderosa*

Relave	Fases	Composición (%)
(Oxido) Cuarzo	$\text{SiO}_2$	52,07
(Clorita)Clinocloro	$(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	11,79
Albita	$\text{AlNaO}_8\text{Si}_3$	9,42
Illite	$\text{Al}_2\text{HKO}_{12}\text{Si}_4$	9,20
(Sulfuro)Pirita	$\text{FeS}_2$	5,69
(Carbonato)Calcita	$\text{CaCO}_3$	3,63
Muscovita	$\text{K}(\text{Al}_{1,88}\text{Fe}_{12})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2,93
(Sulfuro)Arsenopirita	$\text{AsFeS}$	2,14
Esfalerita	$(\text{Zn,Fe})\text{S}$	1,72
Galena	$\text{PbS}$	0,24
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	0,48

Ortoclasa	$\text{AlK}_2\text{O}_8\text{Si}_3$	0,04
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	0,64
<b>Total</b>		<b>100.00</b>

**Fuente:** Laboratorio de la Compañía Minera Poderosa.

Se analizó los posibles amarres entre los minerales presentes en el relave de la Planta Marañón mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB); en el Laboratorio FA INGENIEROS S.A.C. Los resultados se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.**

*Resultados de MEB de la muestra de relave de la Planta Marañón*

Minerales	Descripción	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
Yeso	De formas fibrosas; se encuentra intercrecido con galena y pirita.	< 25
Arsenopirita	De formas subhedrales de hábitos rómbicos; se encuentra como partículas libres e intercrecido con galena.	2 a 40
Galena	De formas irregulares y subredondeadas; está intercrecido con arsenopirita.	> 20
Esfalerita	De formas irregulares y subredondeadas; está intercrecido con arsenopirita.	> 30
Pirita	De formas irregulares y subredondeadas; está intercrecido con arsenopirita.	> 20

**Fuente:** Laboratorio FA INGENIEROS S.A.C.

En esta tabla se da los minerales encontrados en el relave, la liberación y amarres de los minerales sulfurados y el rango de tamaño en la que se encuentran.

Otro detalle que se determinó es que el oro se encuentra en la arsenopirita, mediante el análisis por Espectrometría por Dispersión en Energía (EDS) del MEB, obteniéndose el siguiente resultado elemental mostrado en la tabla 3.

**Tabla 3.**

*Composición química (%) de los minerales identificados en el relave de la Planta Marañón por Espectrometría por Dispersión en Energía (EDS)*

Minerales	O	Na	Al	Si	S	Ca	Fe	Zn	As	Cd	Pb	Au	Total
Yeso	58,47			6,78	16,51	18,24							100
Arsenopirita					25,19		33,07		40,79			0,95	100
Galena					21,44						78,56		100
Pirita					55,65		44,35						100
Esfalerita					37,64		2,76	58,41		1,19			100
Andesina	41,74	5,69	14,81	33,5		4,27							100

**Fuente:** Laboratorio FA INGENIEROS S.A.C.

Demostrando este hecho que el oro se encuentra en la Arsenopirita y sabemos por experiencia que este oro en la arsenopirita es refractario a la cianuración.

## 2.5. Ley de cabeza (relave)

Los ensayos de oro y plata se realizaron en el laboratorio de Compañía Minera Poderosa y se complementaron con los datos de DRX de este relave presentados en la tabla 4.

**Tabla 4.**

*Ley de Relave de la Planta Marañón, Compañía Minera Poderosa*

	Au g/TM	Ag g/TM	Pb (%)	Zn (%)	As (%)	Fe (%)	S (%)
<b>Cabeza</b>	1,6	13,6	0,21	1,15	0,99	3,39	4,06

**Fuente:** Laboratorio de la Compañía Minera Poderosa.

Se observa que el relave de la Planta Marañón tiene una buena ley de oro y plata y que es necesario recuperarlo. Del ensayo por DRX de la composición de fases se determinó la siguiente composición básica de este relave, datos que se dan en la tabla 5. De acuerdo con esto se observa que el contenido de Carbonato de calcio es de 3,89%.

**Tabla 5.**

*Composición Mineralógica Básica y Leyes de la ganga*

Minerales	Peso (%)	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O(%)	Mg(%)
Calcita	3,63	2,03		3,63		
Dolomita	0,48	0,15		0,26		0,06
<b>Total</b>	<b>4,11</b>	<b>2,18</b>	<b>0,00</b>	<b>3,89</b>	<b>0,00</b>	<b>0,06</b>

**Fuente:** Laboratorio de la Compañía Minera Poderosa.

## 2.6. Distribución de tamaño de partícula del oro y plata del relave

El análisis granulométrico se determinó en una serie normal de mallas, en la que previamente se extrajo en húmedo el producto < 400m, y el producto > 400m se secó a una temperatura de 110°C por 24h y luego se tamizó de acuerdo con el arreglo indicado, dando como resultado la distribución de la tabla 6

**Tabla 6.**

*Distribución de tamaño del relave de la Planta Marañón (Compañía Minera Poderosa)*

Malla	Abertura (µm) Malla	f <sub>3</sub> (X) Pr. Geom.	R <sub>3</sub> (X)	F <sub>3</sub> (X)
-50	297			
+70	210	250	0,52	0,52
+100	149	177	5,45	5,97
+140	105	125	11,35	17,32
+200	74	88	11,06	28,38
				71,62

+270	63	68	12,00	40,38	59,62
+325	44	53	6,06	46,44	53,56
+400	37	40	7,14	53,58	46,42
-400		19	46,42	100	0,00
<b>Total</b>			100,00		

**Fuente:** Laboratorio de Nanomateriales y Metalurgia-UNI.

El relave de la Planta Marañón se encuentra bastante fino ya que se observa que tiene un porcentaje de 46,42 % de < 37  $\mu\text{m}$ . Los productos de este análisis granulométrico se enviaron a ensayar por Au y Ag y luego se calculó su distribución de estos elementos en esta distribución cuyos resultados se dan en la tabla 7 a continuación:

**Tabla 7.**

*Análisis granulométrico valorado por Au y Ag de relave de la Planta Marañón*

Malla	Abertura ( $\mu\text{m}$ )		$f_3(X)$	Leyes (g/T)		Distribución (%)	
	Malla	Pr. Geom.		Au	Ag	Au	Ag
-50	297						
+70	210	250	0,52	0,30	7,10	0,09	0,29
+100	149	177	5,45	0,30	7,10	1,00	3,09
+140	105	125	11,35	0,50	3,50	3,45	3,17
+200	74	88	11,06	0,70	5,20	4,71	4,59
+270	63	68	12,00	0,50	3,50	3,65	3,35
+325	44	53	6,06	0,40	3,30	1,48	1,60
+400	37	40	7,14	1,50	8,10	6,52	4,62
-400		19	46,42	2,80	21,40	79,10	79,29

**Fuente:** Laboratorio de Nanomateriales y Metalurgia y Laboratorio de la Compañía Minera Poderosa.

Se observa que más del 90% del oro y la plata se encuentran bajo el tamaño de < 74 $\mu\text{m}$ .

## 2.7. Concentración de los minerales sulfurados

### 2.7.1. Pruebas de Flotación

De acuerdo con la caracterización de los relaves de la Planta Marañón, se determinó que no era necesario remoler este material por lo que nos dedicamos a realizar una serie de pruebas de flotación como preámbulo, en las que se varió la adición de colectores tales como el XZ-11, XZ-6 y R-1404 demostrando este hecho la factibilidad de aplicar este proceso para la recuperación del oro y la plata de este relave.

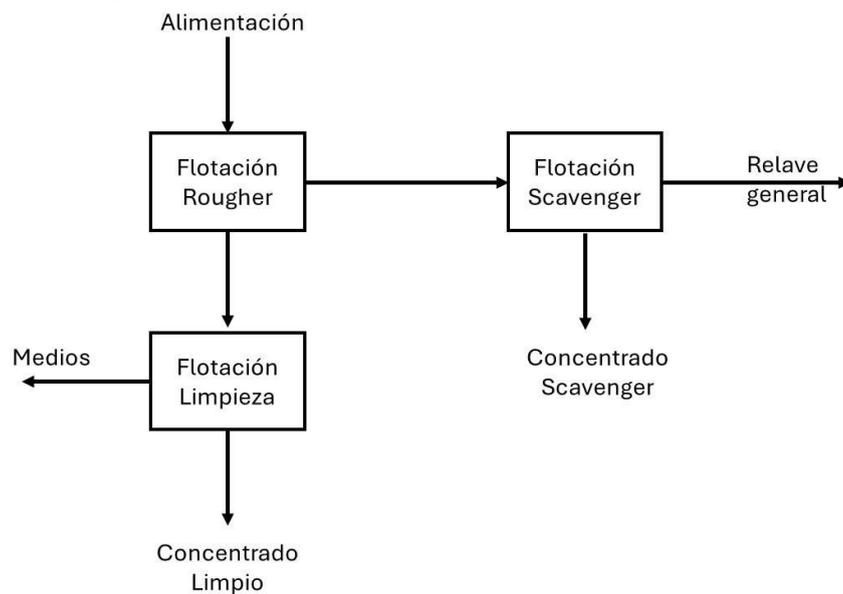
De estas pruebas se llegó a la conclusión que se podría seguir el siguiente esquema discontinuo (Figura 2) para la recuperación del oro y la plata que se encuentran en el relave de la Planta Marañón.

Para el caso de un balance continuo se hizo uso de los coeficientes de distribución, tomando en consideración la recirculación de los medios de la flotación limpia y el concentrado Scavenger a la alimentación; obteniéndose los resultados que se dan en la tabla 8.

Esta prueba se tomó como el nivel central de pruebas para el diseño de experiencias que se realizaron con el relave de la Planta Marañón.

**Figura 2.**

*Esquema discontinuo de flotación de los relaves de la Planta Marañón*



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Tabla 8.**

*Balance continuo de la mejor prueba de flotación del relave de la Planta Marañón*

< 200 $\mu\text{m}$ (%)	XZ-6	AR-1404	A. pino	pH	Producto	Leyes (oz/TC)		Distribución (%)	
	kg/TM	kg/TM	kg/TM			Ag	Au	Ag	Au
					Conc. Au-Ag	42,39	4,29	80,12	76,89
73,5	0,040	0,080	0,042	7,5	Relave Gen.	4,24	0,52	19,88	23,11
					Cab. Calc.	15,21	1,60	100,00	100,00

**Fuente:** Laboratorio de la Compañía Minera Poderosa.

En función de estos resultados se procedió a realizar una serie de experiencias, mediante un diseño experimental tomando como variables la dosificación del XZ-6, R-1404 y el pH, en ese caso se tomó el diseño de 23 experiencias (8 pruebas), más tres (03) pruebas en el nivel central.

Tomándose como variable respuesta la recuperación del oro que es el principal valor de este relave; siendo el principal objetivo obtener la máxima recuperación de oro (aproximadamente 90%) para considerar que esta estrategia tomada como alternativa sea la adecuada. Las condiciones de estas pruebas se dan en la tabla 9.

**Tabla 9.**
*Condiciones de las pruebas del diseño experimental del relave de la Planta Marañón*

N°	pH	XZ-6	AR-1404	pH	Dosificación (Kg/T)	
					XZ-6	AR-1404
1	1	1	1	8,5	0,03	0,05
2	1	1	-1	8,5	0,03	0,03
3	1	-1	1	8,5	0,01	0,05
4	1	-1	-1	8,5	0,01	0,03
5	-1	1	1	6,5	0,03	0,05
6	-1	1	-1	6,5	0,03	0,03
7	-1	-1	1	6,5	0,01	0,05
8	-1	-1	-1	6,5	0,01	0,03
9	0	0	0	7,5	0,02	0,04
10	0	0	0	7,5	0,02	0,04
11	0	0	0	7,5	0,02	0,04

**Fuente:** Laboratorio de Nanomateriales y Metalurgia-UNI.

### 2.8. Ejemplos de casos reales

Se tomó como ejemplo el caso de Compañía Minera Lincuna y Compañía Minera Huancapeti en la que se adoptó esta alternativa, que es la flotación de los relaves de su circuito Pb-Zn (Yoplac, 2010).

En este caso se partió de relaves de flotación de Pb-Zn y el mejor resultado que se obtuvo es lo que se da en tabla 10.

**Tabla 10.**
*Separación de piritas de arsenopirita*

Prueba	< 200 $\mu$ m (%)	Na <sub>2</sub> S (g/TM)	XZ-6 (g/TM)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/TM)	R-404 (g/TM)	MIBC (g/TM)	pH	Producto
AE-E3		2200	20			28	8,9	Conc. Piritas
	65			7400	150	20	4,5	Conc. Arsenopirita Relav.
<b>Total</b>		2200	20	7400	150	48		

Prueba	Producto	LEYES Au y Ag (g/TM)		RECUPERACIONES (%)		REL. CONC.
		Ag	Au	Ag	Au	
	Conc. Piritas	316,9	2,80	18,20	5,55	33,00
AE-E3	Conc. Arsenopirita	70,1	7,35	18,80	68,03	7,06
	Relav	40,1	0,49	62,99	26,42	1,21
<b>Total</b>	Cab. Calculada.	52,8	1,53	100,00	100,00	

**Fuente:** Yoplac Castromonte, E. 2010- EYC 005.

### 3. Resultados

#### 3.1. Resultados obtenidos de las pruebas de flotación en el tratamiento de los relaves de Marañón

Los resultados obtenidos en las pruebas de flotación propuestos de acuerdo con el diseño experimental tomando en cuenta para un circuito continuo se da en la tabla 11.

**Tabla 11.**

*Fases y composición del relave de la Planta Marañón de Poderosa*

N°	pH	XZ-6	AR-1404	pH	Dosificación (Kg/T)		Extracción Au (%)
					XZ-6	AR-1404	
1	1	1	1	8,5	0,03	0,05	71,64
2	1	1	-1	8,5	0,03	0,03	76,51
3	1	-1	1	8,5	0,01	0,05	70,83
4	1	-1	-1	8,5	0,01	0,03	71,33
5	-1	1	1	6,5	0,03	0,05	86,66
6	-1	1	-1	6,5	0,03	0,03	82,38
7	-1	-1	1	6,5	0,01	0,05	70,85
8	-1	-1	-1	6,5	0,01	0,03	72,63
9	0	0	0	7,5	0,02	0,04	76,89
10	0	0	0	7,5	0,02	0,04	81,60
11	0	0	0	7,5	0,02	0,04	80,99

**Fuente:** Laboratorio de Compañía Minera Poderosa.

Otro resultado que hay que tener en cuenta, es la composición mineralógica del relave de relave que se compara con el relave de la Planta Marañón y que se da en la siguiente tabla 12.

**Tabla 12.**

*Comparación de la mineralogía de relaves de pruebas de flotación*

Minerales	Fases	Relave (cianuración)	Relave (Relave)
(Oxido) Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	52,07	61,65
(Clorita)Clinocloro	(Mg,Fe) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	11,79	15,70
Albita	AlNaO <sub>8</sub> Si <sub>3</sub>	9,42	-
Illite	Al <sub>2</sub> HKO <sub>12</sub> Si <sub>4</sub>	9,20	-
(Sulfuro)Pirita	FeS <sub>2</sub>	5,69	0,27
(Carbonato)Calcita	CaCO <sub>3</sub>	3,63	3,73
Muscovita	K(Al <sub>1,88</sub> Fe <sub>12</sub> )(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	2,93	17,93
(Sulfuro)Arsenopirita	AsFeS	2,14	-
Esfalerita	(Zn,Fe)S	1,72	-
Galena	PbS	0,24	-
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,48	0,71
Ortoclasa	AlKO <sub>8</sub> Si <sub>3</sub>	0,04	-
Actinolita	Ca <sub>2</sub> (Mg,Fe) <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	0,64	-

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

## 4. Discusión

### 4.1. Flotación de los relaves

Se hizo uso del Software Minitab para realizar un análisis estadístico de los resultados obtenidos, tomando como variables dependientes el criterio de recuperación de oro. En la tabla 13, se da el análisis de varianza y la probabilidad de uso de los datos analizados.

**Tabla 13.**

*Análisis de varianza y probabilidad*

Fuente	Valor F	Valor p
Modelo	4,6	0,119
Lineal	7	0,072
pH	6,92	0,078
Z-6	13,97	0,033
AR-1404	0,12	0,756
Interacciones de 2 términos	2,09	0,28
pH*Z-6	5,37	0,103
pH*AR-1404	0,87	0,42
Z-6*AR-1404	0,04	0,854

**Fuente:** Elaboración empleando Software Minitab (2024).

Se puede observar que la variable más significativa es la dosificación del colector XZ-6, siguiéndolo en segundo orden el pH y por último la dosificación de colector R-1404. Con respecto a las interacciones la más significativa es la del pH\*XZ6.

En relación con los efectos de las variables independiente con respecto al criterio de recuperación de oro (variable dependiente), estos se pueden observar en la figura 3. En ella se observa que la dosificación del colector XZ-6 su efecto es bastante positivo en la recuperación de oro, siguiéndole en ese orden el pH y en el caso del R-1404 su efecto es casi nulo.

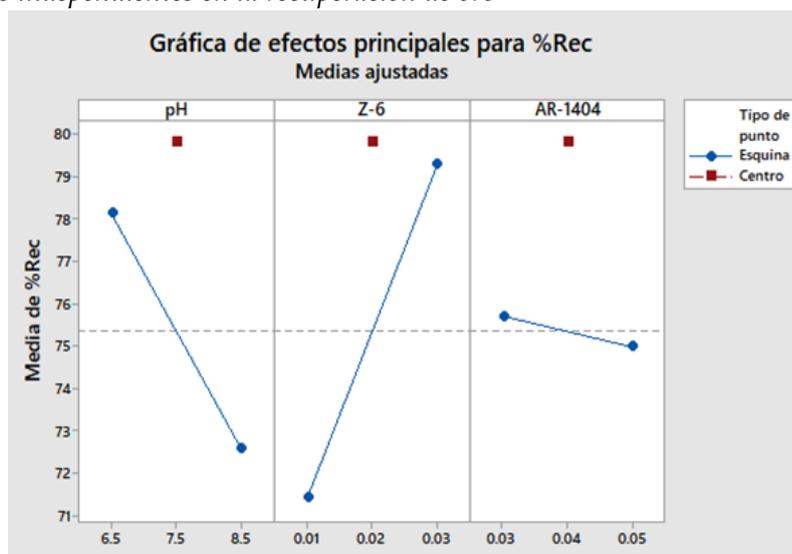
En función de este análisis se planteó el modelo empírico que se da a continuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Rec Au (\%)} = & 25.2 + 6.05 * pH + 2145 * XZ6 + 660 * R1404 - 245 * pH * XZ6 - 98 * pH \\
 & * R1404 + 2113 * XZ6 * R1404 + 4.7(\text{nivel central}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

Cuyo coeficiente de correlación ( $R^2$ ) es 0,9148 indicando que todos los datos tomados son válidos. En función de esto se obtuvo la figura 4 de contorno de recuperación de oro con respecto a las variables más significativas, como son el pH y la dosificación de XZ-6 donde se obtiene la región de trabajo óptima para obtener una mayor recuperación de oro.

**Figura 3.**

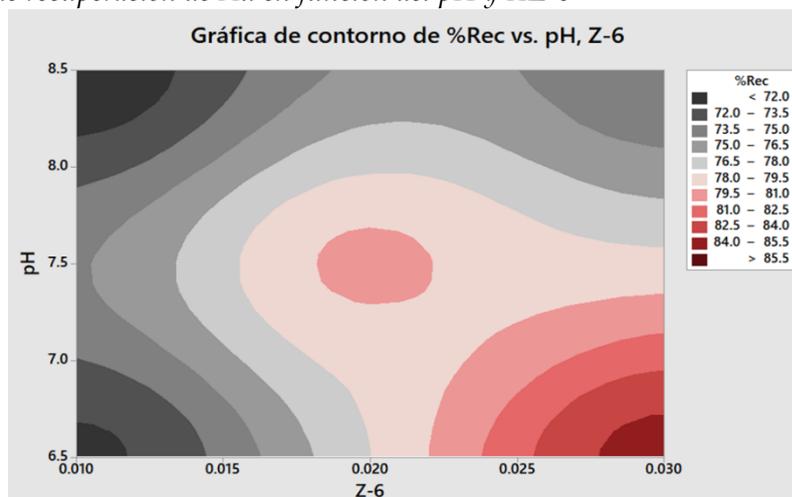
*Efecto de las variables independientes en la recuperación de oro*



**Fuente:** Elaboración empleando Software Minitab (2024).

**Figura 4.**

*Gráfica de contorno de recuperación de Au en función del pH y XZ-6*



**Fuente:** Elaboración empleando Software Minitab (2024).

Finalmente, los valores óptimos a utilizar sería Dosificación de XZ-6: 0,03, y R-1404: 0,05 kg/T y pH:6,5 para obtener un Recuperación de oro de 86,66%.

#### 4.2. Análisis del Impacto ambiental y uso posterior de los relaves

Analizando los ensayos del relave de planta y los relaves obtenidos de las pruebas de flotación realizadas tenemos los siguientes análisis:

A) En el caso de relave de cianuración tenemos la siguiente composición, tabla 14:

**Tabla 14.**

*Composición Mineralógica de sulfuros y leyes/Relaves de Cianuración de Planta Marañon*

Composición Mineralógica de Sulfuros y Leyes						
Relave de cianuración de Planta Marañon - Compañía Minera Poderosa						
Mineral	Peso (%)	Fe(%)	As(%)	S(%)	Pb(%)	Zn(%)
Esfalerita	1,72			0,57		1,15
Galena	0,24			0,03	0,21	
Pirita	5,69	2,65		3,04		
Arsenopirita	2,14	0,73	0,99	0,42		
Ganga	90,21					
Total	100,00	3,39	0,99	4,06	0,21	1,15

Composición Mineralógica Básica y Leyes de la ganga						
Relave de cianuración de Planta Marañon - Compañía Minera Poderosa						
Mineral	Peso (%)	CaO(%)	SiO <sub>2</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O(%)	Mg(%)
Calcita	3,63	2,03		3,63		
Dolomita	0,48	0,15		0,26		0,06
Total	4,11	2,18	0,00	3,89	0,00	0,06

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

B) En el caso del relave de flotación tenemos la siguiente composición, tabla 15:

**Tabla 15.**

*Composición Mineralógica de sulfuros y leyes/Relaves de flotación de Planta Marañon*

Composición Mineralógica de Sulfuros y leyes						
Relave de flotación de la Planta Marañon - Compañía Minera Poderosa						
Mineral	Peso (%)	Fe(%)	As(%)	S(%)	Pb(%)	Zn(%)
Esfalerita	0,00			0,00		0,00
Galena	0,00			0,00	0,00	
Pirita	0,27	0,13		0,14		
Arsenopirita	0,00	0,00	0,00	0,00		
Ganga	99,73					
Total	100,00	0,13	0,00	0,14	0,00	0,00

Composición Mineralógica Básica y Leyes de la ganga						
Relave de flotación de la Planta Marañon - Compañía Minera Poderosa						
Mineral	Peso (%)	CaO(%)	SiO <sub>2</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O(%)	Mg(%)
Calcita	3,73	2,09		3,73		
Dolomita	0,71	0,22		0,39		0,09
Total	4,44	2,31	0,00	4,12	0,00	0,09

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

El criterio para determinar si el material es generador de aguas acidas, es si determinamos el Potencial Neto de Neutralización (NNP) del material a ensayar.

Es por esta razón que es necesario conocer el potencial Ácido - Base (PNN) el cual está dado por el contenido de sulfuros (AP) contrastado frente al contenido neto de mineral soporte o consumidor de ácido (NP), el cual está expresado en forma matemática (Wang, Q. *et al* (2020):

$$NNP = NP - AP$$

AP = %S como sulfuro\*31,25 en Kg CaCO<sub>3</sub> requerido/1000Kg de material.

NP = Kg. CaCO<sub>3</sub> requerido /1000 Kg. de material.

Tomándose en cuenta las siguientes reglas:

- Si el NNP > + 20 kg. CaCO<sub>3</sub>/1000 Kg. de material, no se producirá drenaje ácido o si el NP/AP > 3
- Si el NNP < 0 y NP/AP < 1 en este caso se producirá drenaje ácido.

De acuerdo con estos criterios y usando los datos de las tablas arriba señaladas tenemos los resultados de la tabla 16.

**Tabla 16.**

*Cálculos del potencial (NNP) de los relaves indicados*

MUESTRA	Leyes (%)		Potencial (t CaCO <sub>3</sub> /1000Kg)			Relación NP/AP
	Como CaCO <sub>3</sub>	Como S <sup>-2</sup>	Acido (AP)	Neutralización (NP)	Neto de neutralización (NNP)	
Relave de Cianuración	3,89	4,03	125,9	38,90	-87,04	0,3
Relave de Flotación	4,12	0,14	4,4	41,20	36,83	9,4

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

De acuerdo con estos resultados se llega a la conclusión que el relave de cianuración de la planta de cianuración va a generar aguas ácidas y con un riesgo de que en los efluentes líquidos de este relave se evacue el Arsénico.

En el caso de los relaves después de flotar todos los sulfuros no va a generar aguas ácidas y por ende no se va a generar Arsénico en solución.

Otro punto positivo de esta alternativa es que se puede disminuir la evacuación de estos residuos, mediante la fabricación de ladrillos para la industria de la construcción del entorno de la Compañía Minera Poderosa y lo más importante a condiciones normales; tal como se puede apreciar en la figura 5.

La fabricación de ladrillos fue elaborado empleando el relave de relave de la Planta de Marañon-Compañía Minera Poderosa en el Laboratorio de Investigación Nanomateriales y

metalurgia en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica - Universidad Nacional de Ingeniería.

### Figura 5.

*Fabricación de ladrillos para la industria de la construcción del entorno de la mina Poderosa.*



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

#### **4.3 Evaluación de la viabilidad y factibilidad de implementación de las estrategias en la industria minera**

La concentración por flotación es una tecnología bastante conocida en nuestro medio y por lo tanto su viabilidad técnica de aplicar es muy sencilla. Con respecto a la aplicación de fabricar ladrillos desde el punto de vista técnico no hay ningún problema ya que es algo bastante conocido en nuestro medio.

## **5. Conclusiones**

El estudio realizado sobre el tratamiento de relaves en la minería ha arrojado varios hallazgos y resultados relevantes. Estos pueden resumirse de la siguiente manera:

1. La caracterización de los relaves nos ha permitido determinar que el oro se encuentra en la arsenopirita y en concentraciones altas y a la vez se determinó que está en una granulometría fina y que el oro y la plata se encuentran en las fracciones de < 200 m, en gran proporción; indicándonos esto que la arsenopirita también se encuentra en tamaños finos y que en este caso es potencial elemento tóxico de contaminación de las aguas superficiales y suelos.
2. Se ha probado que la flotación es una alternativa muy buena, para recuperar los elementos valiosos de estos relaves y nos permite eliminar los elementos tóxicos de estos relaves.
3. La aplicación de la economía circular al tratamiento de relaves en la minería ha demostrado importantes beneficios ambientales. Esto incluye la reducción de la generación de residuos, y la minimización de los impactos negativos en los ecosistemas.
4. La adopción de enfoques circulares en el tratamiento de relaves también ha mostrado beneficios económicos significativos. Esto se debe a la recuperación de materiales valiosos como el oro y la plata y a la posibilidad de reutilizar los relaves tratados en otros procesos productivos, como la fabricación de ladrillos con los relaves limpios, sin generar impactos negativos.

Se recomienda realizar en forma profunda trabajos sobre la separación del cuarzo de la clorita: En el caso del cuarzo para obtener un producto puro para la industria del vidrio y reemplazar a los plásticos en la fabricación de botellas.

La clorita tiene varias aplicaciones y usos en diferentes campos: Se utiliza en procesos metalúrgicos como un agente lixiviante y como fuente de magnesio para la producción de aleaciones y productos metálicos. En la construcción, la clorita se utiliza como un material de relleno en productos de cemento y concreto, proporcionando resistencia y durabilidad adicionales. Se emplea en la fabricación de cerámica y porcelana, ya que actúa como un agente fundente y ayuda a mejorar las propiedades físicas de los materiales cerámicos. En la industria de cosméticos y cuidado personal, la clorita se utiliza en productos de maquillaje, como sombras de ojos y polvos, debido a su capacidad para proporcionar color y textura.

## 5. Referencias

- Hamraoui, L., Bergani, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A. y Benzaazoua, M. (2024). Hacia una economía circular en la industria minera: Soluciones posibles para la recuperación de agua a través del deshidratado avanzado de relaves minerales. *Minerals*, 14(3), 319. <https://doi.org/10.3390/min14030319>
- Huerta, J. M., Cayumil Montecino, R. y Sánchez Medina, M. (2021). Una aproximación termodinámica para la comprensión de la economía circular aplicada al ámbito minero-metalúrgico. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 6(1), 26-32.
- Kiventerä, J., Lancellotti, I., Catauro, M., Dal Poggetto, F., Leonelli, C. y Illikainen, M. (2018). Alkali activation as new option for gold mine tailings inertization. *Journal of Cleaner Production*, 187, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.182>
- Lacy, P., Long, J., Spindler, W. y Spindler, W. (2020). Perfil de la industria de metales y minería. En *The Circular Economy Handbook: Realizing the Circular Advantage* (pp. 87-97). [https://doi.org/10.1057/978-1-349-95968-6\\_5](https://doi.org/10.1057/978-1-349-95968-6_5)
- MEND. (1991). *Acid Rock Drainage Prediction Manual*. MEND Project 1.16.1b. Department of Energy, Mines and Resources Canada. <https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/1.16.1b.pdf>
- Ojeda, M. y Reyes, J. (2006). Recuperación de metales preciosos provenientes de presa de jales. Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP, México. <https://studylib.es/doc/4754663/recuperaci%C3%B3n-de-metales-preciosos>
- Perales Medina, S. (2021). *Economía circular de materiales para la construcción* [Tesis de licenciatura, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2117/358762>
- Torres Gonzales, Y., Gonzales Cabrera, R., Cotera Nuñez, I. A. y Arana-Ruedas, D. P. R. (2024). Valorización de residuos mineros como áridos para la construcción de carreteras: Economía circular en la región andina del Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 26(2), 71-78. <https://doi.org/10.18271/ria.2024.605>

- Wang, Q., Li, J., Zhu, X., Yao, G., Wu, P., Wang, Z. y Wang, J. (2020). Approach to the management of gold ore tailings via its application in cement production. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122303. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122303>
- Yoplac Castromonte, Y. (2010). Pruebas de flotación de relaves de flotación Au-Ag, de propiedad de Cía. minera Huancapeti S.A.C. *Informe Personal EYC-003-2010*.
- Yoplac Castromonte, Y. (2010). Pruebas de flotación y cianuración de piritas Au-Ag de relaves de Ticapampa, de propiedad de Cía. Minera Lincuna S.A.C. *Informe Personal EYC-005-2010*.
- Zamora, G., Blanco Vino, W. y Hinojosa Carrasco, O. (2019). Economía circular en minería: procesamiento de desmontes como alternativa de remediación ambiental. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 3-18. [http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/v4n2/v4n2\\_a01.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/v4n2/v4n2_a01.pdf)

## CONTRIBUCIONES DE AUTORES/AS, FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

### Contribuciones de los/as autores/as:

**Conceptualización:** Yoplac Castromonte, Edwilde; Martínez Aguilar, David Pedro; **Software:** Sierra Redhead, Kevin Javier; **Validación:** Yoplac Castromonte, Edwilde; Martínez Aguilar, David Pedro; **Análisis formal:** Yoplac Castromonte, Edwilde; Martínez Aguilar, David Pedro; Uza Teruya, Julio; **Curación de datos:** Yoplac Castromonte, Edwilde; Martínez Aguilar, David Pedro; **Redacción-Preparación del borrador original:** Yoplac Castromonte, Edwilde; **Redacción-Revisión y Edición:** Avalo Cortez, Orfelinda, **Visualización:** Yoplac Castromonte, Edwilde; Avalo Cortez, Orfelinda; Martínez Aguilar, David Pedro; Uza Teruya, Julio y Sierra Redhead, Kevin Javier; **Supervisión:** Yoplac Castromonte, Edwilde; Martínez Aguilar, David Pedro; **Administración de proyectos:** Avalo Cortez, Orfelinda; **Todos los/as autores/as han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito:** Yoplac Castromonte, Edwilde; Avalo Cortez, Orfelinda; Martínez Aguilar, David Pedro; Uza Teruya, Julio y Sierra Redhead, Kevin Javier.

**Financiación:** Esta investigación ha sido financiada por la Compañía Minera Poderosa y por el Vicerrectorado de Investigación que es el órgano rector del sistema de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación de la Universidad Nacional de Ingeniería.

**Agradecimientos:** Se agradece la participación de los docentes del grupo de Investigación Nanomateriales y Metalurgia, así como también a los alumnos practicantes de Material Advantage Student Chapter-UNI de la Escuela de Ingeniería Metalurgia gracias al Convenio Marco y Específico entre la Compañía Minera Poderosa y el Patronato de la Universidad Nacional de Ingeniería (ProUNI).

**Conflicto de intereses:** No existe ningún conflicto de intereses entre los autores.

**AUTOR/ES:****Edwilde Yoplac Castromonte**

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Docente Universitario en el Área de Metalurgia Extractiva y Ambiental. Investigador en el Área de Metalurgia Extractiva y Ambiental. Profesionalmente se desempeñó como metalurgista, llegando a ser Gerente del Dpto. de Investigaciones en el Área de Metalurgia Extractiva en el Banco Minero del Perú y como jefe del Dpto. de Investigaciones Metalúrgicas de SGS del Perú; actualmente se desempeña como consultor en el área de Metalurgia Extractiva en diversas empresas mineras y Doctorando en Ingeniería y Ciencias ambientales en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Metalúrgica en la Universidad de Concepción Chile. Ingeniero Metalurgista egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería.

[eyoplacc@uni.edu.pe](mailto:eyoplacc@uni.edu.pe)

**Índice H:** 1

**Orcid ID:** <https://orcid.org/0000-0003-0288-0008>

**Scopus ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193771071>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=yjptanQAAAAJ&hl=es>

**ResearchGate:** <https://www.researchgate.net/profile/Edwilde-Yoplac>

**Academia.edu:** <https://uni.academia.edu/EdwildeYoplac?swp=rr-ac-122581928>

**Orfelinda Avalo cortez**

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Docente Investigador en la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. 07 años de experiencia como Jefe de Laboratorio y Líder del Grupo de Investigación "Nanomateriales y metalurgia" registrado en el DANI desde el 2016 a la fecha y responsable de la implementación de este laboratorio de investigación. Formación Académica como Bachiller y Título Profesional en Ingeniería Metalúrgica en la Universidad Nacional de Ingeniería. Grado de Doctor y Maestro en Ingeniería Metalúrgica y Materiales, obtenidos en la Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brasil.

[oavalo@uni.edu.pe](mailto:oavalo@uni.edu.pe)

**Índice H:** 1

**Orcid ID:** <https://orcid.org/0000-0002-6619-7227>

**Scopus ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55890683200>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=AjhFQYQAAAAJ&hl=es>

**ResearchGate:** <https://www.researchgate.net/profile/Orfelinda-Avalo>

**Academia.edu:** <https://independent.academia.edu/AvaloCortez>

**David Pedro Martínez Aguilar**

Universidad Nacional de Ingeniería

Investigador en Ingeniería Metalúrgica en la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el Área de metalurgia extractiva y nanomateriales. Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Metalúrgica en la Universidad Nacional de Ingeniería. Docente de Pregrado en los cursos de Cerámica, Procesamiento de

minerales y materiales. Docente de Posgrado en la Maestría de Ingeniería Metalúrgica en el dictado de cursos de Biometalurgia.

[dmartinez@uni.edu.pe](mailto:dmartinez@uni.edu.pe)

**Orcid ID:** <https://orcid.org/0000-0001-6942-8273>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=8Mly7SkAAAAJ&hl=es&oi=ao>

### **Julio Uza Teruya**

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Metalúrgica en la Universidad Nacional de Ingeniería. Ingeniero metalúrgico, trabajó en proyectos de Evaluación de Impacto ambiental-EIA y programa de adecuación y manejo ambiental-PAMAS, para las minas de Centromin, Cerro de Pasco, Mhar Tunel y Minsur; y en la fiscalización de medio ambiente a las mineras Minsur y Andaychahua. Actualmente es profesor de cursos de especialización en Medio Ambiente en la Pontificia Universidad Católica y profesor principal y Director de Investigación en la Escuela Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería del Perú.

[juza@uni.edu.pe](mailto:juza@uni.edu.pe)

**Orcid ID:** <https://orcid.org/0009-0001-0751-1570>

**Academia.edu:** <https://independent.academia.edu/JulioUzaTeruya>

### **Kevin Javier Sierra Redhead**

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Bachiller en Ingeniería Metalúrgica en la Universidad Nacional de Ingeniería, perteneciente al tercio superior. Especializado en procesamiento de minerales, pruebas metalúrgicas y diseño de plantas metalúrgicas. Habilidades de liderazgo y trabajo en equipo demostradas liderando en diversos concursos internacionales de diseño de plantas donde obtuvo puestos finalistas, tanto en Estados Unidos como en Perú.

[kevin.sierra.r@uni.pe](mailto:kevin.sierra.r@uni.pe)

**Orcid ID:** <https://orcid.org/0009-0008-8715-5588>