



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v12i1.4666>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Estructuración de metadatos experimentales para procesos de geopolimerización aplicados a la sostenibilidad y reciclaje de relaves mineros

Structuring experimental metadata for geopolymerization processes applied to the sustainability and recycling of mining tailings

Estruturação de metadados experimentais para processos de geopolimerização aplicados à sustentabilidade e reciclagem de rejeitos de mineração

Katherine Michelle Diaz Medina ^I
michelle.diaz@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0006-4846-157X>

Correspondencia: michelle.diaz@epoch.edu.ec

***Recibido:** 12 de noviembre de 2025 ***Aceptado:** 17 de diciembre de 2025 *** Publicado:** 19 de enero de 2026

- I. Magíster en Minas Mención en Mineralurgia y Metalurgia Extractiva, Ingeniera en Geología, Docente de la Facultad de Recursos Naturales de la Carrera de Minas de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo Sede Morona Santiago, Macas, Ecuador.

Resumen

La acumulación de relaves mineros en la Relavera Comunitaria El Tablón (RCET), ubicada en el Distrito Zaruma–Portovelo, constituye un pasivo ambiental crítico debido a su alto contenido de sulfuros y metales de transición con potencial tóxico. Frente a esta problemática, la geopolimerización se plantea como una alternativa sostenible capaz de transformar residuos mineros en materiales estables y de menor impacto. El objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad de geopolímeros elaborados a partir de relaves de la RCET para inmovilizar metales de transición y determinar su viabilidad como insumo para aplicaciones constructivas en zonas mineras. La metodología combinó una caracterización física, química y mineralógica del relave con un diseño experimental basado en cuatro mezclas geopoliméricas, sometidas a ensayos de compresión, lixiviación y análisis estructural mediante XRD, FTIR y SEM.

La muestra presentó elevadas concentraciones de As, Pb, Cr, Cd, Cu y Zn, confirmando su peligrosidad. Las mezclas RCC y CE alcanzaron resistencias mecánicas dentro del rango establecido por la NEC 2015, mientras que los ensayos de lixiviación evidenciaron una reducción significativa en la movilidad de los metales, especialmente Cr, Cd, Cu y Ni. Los análisis estructurales confirmaron la formación de redes amorfas y geles aluminosilicato-cálcicos responsables del encapsulamiento. En conclusión, la geopolimerización demostró ser una alternativa viable para estabilizar relaves mineros del área de estudio y generar materiales con potencial de uso en aplicaciones constructivas no estructurales, contribuyendo a la gestión sostenible de pasivos ambientales en regiones mineras.

Palabras Claves: Geopolímeros; inmovilización de metales; relaves mineros; materiales de construcción; análisis de datos; desechos mineros.

Abstract

The accumulation of mining tailings at the El Tablón Community Tailings Dam (RCET), located in the Zaruma–Portovelo District, constitutes a critical environmental liability due to its high content of sulfides and transition metals with toxic potential. Faced with this problem, geopolymerization is proposed as a sustainable alternative capable of transforming mining waste into stable materials with a lower environmental impact. The objective of this research was to evaluate the capacity of geopolymers made from RCET tailings to immobilize transition metals and determine their viability as an input for construction applications in mining areas. The methodology combined a physical, chemical, and mineralogical characterization of the tailings with an experimental design based on

four geopolymer mixtures, subjected to compression, leaching, and structural analysis tests using XRD, FTIR, and SEM.

The sample presented high concentrations of As, Pb, Cr, Cd, Cu, and Zn, confirming their hazardous nature. The RCC and CE blends achieved mechanical strengths within the range established by the NEC 2015, while leaching tests showed a significant reduction in metal mobility, especially Cr, Cd, Cu, and Ni. Structural analyses confirmed the formation of amorphous networks and calcium aluminosilicate gels responsible for encapsulation. In conclusion, geopolimerization proved to be a viable alternative for stabilizing mine tailings in the study area and generating materials with potential use in non-structural construction applications, contributing to the sustainable management of environmental liabilities in mining regions.

Keywords: Geopolymers; metal immobilization; mine tailings; construction materials; data analysis; mining waste.

Resumo

O acúmulo de rejeitos de mineração na Barragem de Rejeitos Comunitários El Tablón (RCET), localizada no Distrito de Zaruma-Portovelo, constitui um passivo ambiental crítico devido ao seu alto teor de sulfetos e metais de transição com potencial tóxico. Diante desse problema, a geopolimerização é proposta como uma alternativa sustentável capaz de transformar resíduos de mineração em materiais estáveis com menor impacto ambiental. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a capacidade de geopolímeros produzidos a partir de rejeitos da RCET em imobilizar metais de transição e determinar sua viabilidade como insumo para aplicações na construção civil em áreas de mineração. A metodologia combinou uma caracterização físico-química e mineralógica dos rejeitos com um delineamento experimental baseado em quatro misturas de geopolímeros, submetidas a ensaios de compressão, lixiviação e análise estrutural por meio de DRX, FTIR e MEV.

A amostra apresentou altas concentrações de As, Pb, Cr, Cd, Cu e Zn, confirmando sua natureza perigosa. As misturas de RCC e CE atingiram resistências mecânicas dentro da faixa estabelecida pela NEC 2015, enquanto os testes de lixiviação mostraram uma redução significativa na mobilidade dos metais, especialmente Cr, Cd, Cu e Ni. As análises estruturais confirmaram a formação de redes amorfas e géis de aluminossilicato de cálcio responsáveis pelo encapsulamento. Em conclusão, a geopolimerização provou ser uma alternativa viável para estabilizar rejeitos de mineração na área de

estudo e gerar materiais com potencial uso em aplicações de construção não estruturais, contribuindo para a gestão sustentável dos passivos ambientais em regiões de mineração.

Palavras-chave: Geopolímeros; imobilização de metais; rejeitos de mineração; materiais de construção; análise de dados; resíduos de mineração.

Introducción

La industria minera contemporánea reconoce su capacidad para impulsar el desarrollo económico y aportar beneficios significativos a los países donde opera, siempre que sus actividades se gestionen de manera responsable (MMSD, 2001). No obstante, en contextos donde predomina la minería tradicional o con limitados controles ambientales, los impactos negativos pueden ser profundos. En Ecuador, particularmente en los cantones Zaruma y Portovelo, la extracción aurífera históricamente ha empleado métodos basados en cianuro y mercurio, contribuyendo hasta en un 19,45 % a la contaminación del agua en la provincia de El Oro (Carvajal et al., 2022). Esta situación se agrava debido a que los relaves mineros suelen depositarse en entornos de minería inactiva o abandonada, expuestos a condiciones climáticas tropicales altas temperaturas, humedad y precipitaciones frecuentes que favorecen la generación de lixiviados metálicos y otros compuestos tóxicos. En ausencia de tratamientos post-depósito, estos materiales forman escombreras y piscinas de relaves que representan riesgos persistentes para los ecosistemas y la salud humana (Paz-Gómez et al., 2021a).

Frente a este escenario, la economía circular se ha posicionado como un enfoque estratégico para promover la sostenibilidad en la industria minera, fomentando la transformación de residuos en materiales de valor agregado (González-Sánchez et al., 2023). Una de las alternativas más prometedoras es la geopolimerización, proceso capaz de convertir relaves ricos en aluminosilicatos en materiales inertes y mecánicamente estables, mediante la activación alcalina y formación de estructuras tridimensionales de aluminosilicatos (Rožek et al., 2021). Países como Perú, México y Chile han incorporado esta técnica para reutilizar residuos mineros y generar productos con aplicaciones en construcción, encapsulación de metales y materiales con propiedades térmicas avanzadas.

Estudios recientes del Instituto de Ingenieros de Minas del Perú muestran la viabilidad de fabricar geopolímeros mediante la interacción de aluminosilicatos con soluciones alcalinas como hidróxido de sodio, obteniendo resultados favorables en resistencia y estabilidad (Yibran et al., 2021). De

Estructuración de metadatos experimentales para procesos de geopolimerización aplicados a la sostenibilidad y reciclaje de relaves mineros

manera complementaria, investigaciones desarrolladas en el Tecnológico Nacional de México han demostrado que los geopolímeros pueden funcionar como materiales aislantes, poseer propiedades hidrofóbicas e incluso utilizarse en tratamiento de aguas residuales para retener metales contaminantes (Martínez, 2022).

En Ecuador, la aplicación de la geopolimerización usando relaves mineros aún es incipiente, pese a su potencial para mitigar pasivos ambientales y disminuir el uso de materias primas convencionales. Aunque existen estudios que trabajaron con zeolitas naturales para producir hormigones geopoliméricos con capacidad de inmovilizar metales de transición Chang (2017), la investigación orientada específicamente a relaves mineros continúa siendo limitada. Esta brecha no solo es experimental, sino también informativa: los estudios existentes suelen presentar variabilidad en la forma de documentar las características del relave, los parámetros de mezcla, las condiciones de activación y los resultados de caracterización mecánica, térmica o mineralógica (Tian et al., 2022).

La explotación minera en Ecuador ha generado históricamente grandes volúmenes de desechos, entre ellos escombreras y piscinas de relaves acumulados de forma antitécnica, frecuentemente sin procesos de cierre ni remediación ambiental. Estos depósitos, al quedar expuestos por largos periodos a la intemperie, se transforman en pasivos ambientales con potencial de liberar metales pesados y otros compuestos tóxicos hacia el suelo y cuerpos hídricos circundantes (Boskovic et al., 2024a; Ren et al., 2024). En el distrito minero Zaruma–Portovelo, uno de los más antiguos del país, operan alrededor de 80 plantas de beneficio cuyos residuos son almacenados desde 2014 en la Relavera Comunitaria El Tablón (RCET), cuya capacidad de 3 millones de toneladas se encuentra actualmente al 80 % de ocupación (Bravo, 2022).

El continuo crecimiento de la actividad minera y la generación de relaves hace prever que la capacidad de la RCET podría ser sobrepasada en los próximos años, lo que obligaría a identificar nuevos espacios para el acopio de residuos si no se adoptan alternativas de valorización o reciclaje (Genua et al., 2025). Este escenario evidencia la urgencia de implementar soluciones sostenibles que permitan transformar estos materiales, reduciendo su volumen y mitigando su impacto ambiental (Ivanović et al., 2023).

Una de las alternativas más prometedoras es la conversión de relaves en geopolímeros mediante procesos de activación alcalina. Estos materiales, obtenidos por la reacción entre aluminosilicatos y soluciones de pH elevado, generan estructuras tridimensionales capaces de encapsular metales de transición e incrementar la estabilidad química del material (Gupta et al., 2021). Tales matrices

Estructuración de metadatos experimentales para procesos de geopolimerización aplicados a la sostenibilidad y reciclaje de relaves mineros

geopoliméricas exhiben propiedades mecánicas comparables e incluso superiores a las de materiales convencionales de construcción, además de ventajas como menor peso, aislamiento térmico y reducción del uso de cemento Portland. La inmovilización de metales lograda a través de este proceso no solo disminuye la peligrosidad de los relaves, sino que también abre la puerta a su reincorporación en aplicaciones constructivas, especialmente en zonas mineras alejadas de los principales centros de producción (Boskovic et al., 2024b; Mahfoud et al., 2024).

La necesidad de intervenir en la gestión de relaves se evidencia también a nivel internacional. El colapso de la relavera en Brumadinho (Brasil) en enero de 2019, que provocó más de 120 fallecidos, 226 desaparecidos y daños ambientales irreversibles sobre más de 270 hectáreas BBC (2019), puso de manifiesto que la acumulación antitécnica de residuos constituye un riesgo significativo que puede desencadenar desastres de gran magnitud. Este hecho refuerza la relevancia de avanzar hacia soluciones que integren seguridad, sostenibilidad y aprovechamiento de materiales residuales.

En este contexto, la geopolimerización representa una alternativa tecnológica alineada con los principios de economía circular, al transformar un desecho problemático en un insumo para nuevos productos. Sin embargo, para garantizar la reproducibilidad y escalabilidad de estos procesos es indispensable contar con una estandarización adecuada de la información experimental (Fonseca Alfonso et al., 2024). La caracterización físico-química de los relaves, los parámetros de mezcla, las condiciones de curado y los análisis mineralógicos, térmicos y mecánicos deben documentarse mediante esquemas de metadatos que permitan trazar el origen, transformación y desempeño de cada formulación (Perná et al., 2024).

El distrito minero Zaruma–Portovelo, ubicado en la provincia de El Oro, constituye uno de los enclaves auríferos más importantes del Ecuador, con una historia de explotación que se remonta a varios siglos. La actividad minera en esta región ha generado grandes volúmenes de residuos, principalmente relaves, que han sido depositados en estructuras como la Relavera Comunitaria El Tablón, la cual actualmente se encuentra cercana al 80 % de su capacidad operativa (ARCOM, 2019; Bravo, 2022). Estos depósitos, al estar conformados por material fino, humedad residual y remanentes de sulfuros metálicos, poseen un alto potencial de generar procesos de lixiviación y liberación de contaminantes. En términos ambientales, los relaves son considerados pasivos ambientales mineros debido a los riesgos permanentes que representan para los ecosistemas y para las poblaciones aledañas cuando no cuentan con controles técnicos adecuados (ASGMI, 2022; MAE, 2018).

Estructuración de metadatos experimentales para procesos de geopolimerización aplicados a la sostenibilidad y reciclaje de relaves mineros

Desde una perspectiva geológica, el distrito Zaruma–Portovelo se emplaza dentro del Complejo Metamórfico de El Oro, caracterizado por la presencia de rocas metamórficas, ígneas y volcánicas que favorecen la formación de vetas mineralizadas de alto interés económico. La mineralogía del distrito, dominada por piritita, calcopiritita, arsenopiritita y cuarzo, es reflejo de un sistema hidrotermal amplio que ha dado origen a numerosas vetas con rumbos definidos y explotadas durante décadas (ARCOM, 2019; Pratt & Figueroa, 1997). Esta composición geológica influye directamente en las características químicas y mineralógicas de los relaves, lo que a su vez condiciona su comportamiento ambiental, especialmente en escenarios de exposición prolongada al clima tropical.

La acumulación antitécnica de relaves en el país representa uno de los principales desafíos ambientales de la minería metálica, pues estos depósitos pueden generar drenaje ácido, liberar metales pesados y provocar procesos de inestabilidad física que derivan en eventos catastróficos, como ha ocurrido en otras regiones del mundo. Estas condiciones evidencian la necesidad de adoptar métodos sostenibles que permitan valorizar los residuos mineros y mitigar su peligrosidad. En este contexto, la geopolimerización se ha consolidado como una alternativa innovadora para transformar residuos ricos en aluminosilicatos en materiales estables, resistentes y de bajo impacto ambiental mediante procesos de activación alcalina (Manaviparast et al., 2024; Zúñiga & Picado, 2022).

Los geopolímeros se forman a partir de la disolución de sílice y alúmina, seguida de su reestructuración y policondensación en redes tridimensionales de tetraedros SiO_4 y AlO_4 . Este proceso ha sido ampliamente estudiado desde los experimentos pioneros de Davidovits en 1994, quien demostró el potencial de arcillas calcinadas como precursores para cementantes alternativos. Investigaciones posteriores confirmaron la capacidad de los geopolímeros para alcanzar resistencias mecánicas comparables o superiores a las de los cementos tradicionales, además de su notable estabilidad química en ambientes agresivos (Boskovic et al., 2024b; Paz-Gómez et al., 2021b). Asimismo, estudios realizados con residuos mineros —como los de tungsteno o los relaves auríferos ecuatorianos— han mostrado su capacidad para inmovilizar metales de transición mediante el encapsulamiento en la matriz polimérica (Morales Aranibar et al., 2025; Pacheco-Torgal et al., 2008). La caracterización de los materiales geopoliméricos ha incluido técnicas avanzadas como SEM, XRD y FTIR, enfocadas en analizar su microestructura, fases minerales y grupos funcionales, así como ensayos mecánicos y químicos para evaluar resistencia, durabilidad y estabilidad frente a procesos de degradación (Morales Aranibar et al., 2025). El incremento de estudios en este campo ha generado

grandes volúmenes de información experimental diversa, cuya correcta documentación es fundamental para garantizar la reproducibilidad científica.

En función de los desafíos ambientales y técnicos asociados a la acumulación de relaves mineros en el distrito Zaruma–Portovelo, esta investigación se plantea como una alternativa para su valorización mediante procesos de geopolimerización. El objetivo central del estudio es evaluar el potencial de los geopolímeros elaborados a partir de los relaves de la Relavera Comunitaria El Tablón para inmovilizar metales de transición y determinar su viabilidad como una opción sostenible y segura para el reciclaje de residuos mineros.

Metodología

La presente investigación adopta para Mohammad (2000) un enfoque descriptivo y experimental orientado a evaluar el comportamiento de geopolímeros elaborados a partir de los relaves mineros de la Relavera Comunitaria El Tablón (RCET). El proceso metodológico se estructura en tres etapas principales: (i) recolección y preparación de muestras, (ii) caracterización físico-química y mineralógica del relave, y (iii) diseño, elaboración y ensayo de probetas geopoliméricas, complementado por pruebas mecánicas y ensayos de lixiviación. La caracterización inicial de la materia prima permite comprender su comportamiento durante la activación alcalina y las reacciones asociadas al proceso de geopolimerización.

Se recolectaron 25 kg de relave en bruto desde la superficie de la RCET, correspondiente a material expuesto a condiciones meteorológicas. Debido a la compactación del material, se procedió a su disgregación manual utilizando herramientas de impacto suave. Para obtener muestras representativas se aplicó el método de cuarteo (AASHTO, 2003), mediante el cual el material homogenizado se dividió en porciones sucesivas hasta obtener dos submuestras de 12,5 kg cada una. Estas fueron codificadas como PD-001 y PD-002, destinadas a los ensayos de caracterización y elaboración de probetas.

Caracterización del relave

La caracterización del relave se realizó en tres niveles:

a. Caracterización física

La muestra fue secada durante 48 horas a temperatura ambiente para eliminar humedad libre. Posteriormente se determinaron parámetros como densidad aparente, peso específico, humedad

relativa y pH. Para la medición del pH se elaboró una pasta del 30 % de humedad utilizando material completamente seco.

La granulometría se obtuvo mediante tamizado en torre utilizando mallas decrecientes (30, 40, 100, 170, 200, 230 y 325). El procedimiento se repitió diez veces para obtener datos consistentes y generar la curva granulométrica correspondiente.

b. Caracterización química

Se determinaron elementos mayores mediante XRF (fusión alcalina), elementos menores mediante ICP-OES (digestión de cuatro ácidos) y elementos traza y tierras raras mediante ICP-MS. Estos análisis siguieron los procedimientos acreditados basados en normas ASTM y EPA correspondientes.

c. Caracterización mineralógica

Se identificaron fases cristalinas mediante difracción de rayos X (XRD) utilizando un equipo portátil. Los resultados permitieron establecer la presencia de minerales asociados a sulfuros metálicos, silicatos y carbonatos, relevantes para comprender la reactividad alcalina del relave.

Elaboración de probetas geopoliméricas

Se diseñaron cuatro mezclas experimentales utilizando relave como sustituto de agregado fino, variando las proporciones de cemento, carbonato de calcio y solución activadora. Las formulaciones se codificaron como:

- RCA: relave + cemento + agua
- RCC: relave + cemento + solución activadora
- GEO: relave + caliza + solución activadora
- CE: relave + cemento

Las proporciones de cada mezcla, así como las relaciones solución/aglutinante y agua/aglutinante, se presentan en las Tablas correspondientes.

La solución activadora se preparó con caliza micronizada, hidróxido de sodio y silicato de sodio disueltos en agua destilada. Cada mezcla se homogenizó hasta obtener una pasta consistente y se moldeó en cubos de 50 mm siguiendo la norma ASTM C109. Las probetas se curaron en horno a 60 °C durante 24 horas y posteriormente se dejaron en curado ambiente durante 28 días. Para cada formulación se elaboraron tres réplicas.

Ensayos mecánicos de compresión

Las probetas se ensayaron a los 7 días de curado de acuerdo con la norma ASTM C109 para determinar resistencia a la compresión simple. Se utilizó una máquina universal de ensayos con

adquisición digital de datos. Tras la ruptura, los fragmentos de cada probeta se conservaron para realizar los ensayos de lixiviación.

Ensayo de lixiviación

Los fragmentos obtenidos de los ensayos mecánicos fueron pulverizados hasta obtener material fino. Se pesaron 10 g de muestra y se mezclaron con 100 ml de agua destilada, sometiéndolas a agitación continua durante 24 horas. Posteriormente las suspensiones fueron filtradas al vacío para separar la fracción líquida, la cual fue almacenada para análisis químico. Las muestras sólidas y líquidas se enviaron al Centro de Investigación y Desarrollo en Nanotecnología (CIDNA) para análisis complementarios, incluyendo XRD, SEM, TGA-DSC y microscopía óptica. Los códigos de reasignación de muestra se detallan en la Tabla correspondiente.

Ensayos geoquímicos, térmicos y ópticos

Las muestras generadas fueron sometidas a:

- XRD para confirmación de fases cristalinas post-geopolimerización,
- SEM para observar morfología y microestructura,
- TGA-DSC para evaluar estabilidad térmica,
- Microscopía óptica para análisis textural inicial.

Estos ensayos complementan la interpretación del proceso de geopolimerización y la capacidad de encapsulación de metales de transición.

Resultados

Caracterización del relave minero

En esta etapa se caracterizó la muestra de la RCET, donde se realizó un proceso de caracterización física, química y mineralógica. En el proceso de caracterización física se determinó la densidad real de la muestra, peso específico, el tamaño de partículas con granulometría y el índice de pH. La caracterización química se realizó para identificar y cuantificar la composición elemental del relave, a través, de las técnicas de difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido. También, se llevaron a cabo otros tipos de análisis como fluorescencia de rayos X para la caracterización mineralógica.

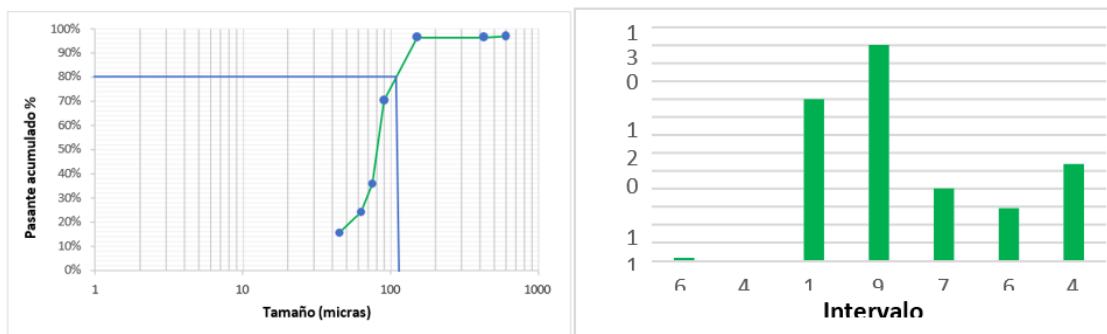
Caracterización física

Los parámetros medidos para la caracterización física de la muestra PD-001 consistió en:

- **Densidad:** Posterior al proceso de preparación de la muestra se calculó la densidad real y aparente con valores de 3.1 g/cm³ y 2.26 g/cm³ respectivamente, en base a los elementos de alta densidad que conforman el relave esto podría incrementar su densidad real, la densidad aparente tiene mayor relación a la de un suelo mineral.
- **Peso específico:** Se tiene un peso específico de 0.31 g/cm³
- **pH:** El valor del pH se calculó en parámetros de peso y humedad conocidos de 30 g a 30% de humedad obteniendo 6.54, lo cual indica una moderada acidez en el relave minero con ligera cercanía a la neutralidad.

Granulometría: La muestra del relave usado en este caso de estudio consta de un compuesto de materiales de diferentes minas, con diferentes procesos de molienda y metalurgia, por tanto, para conocer el tamaño de sus partículas se hizo el análisis granulométrico dando como resultado una concentración de materiales muy finos, con mayor contenido de arenas muy finas en un rango de 90 a 150 micras en 34.6% y 26% de la muestra respectivamente y apenas un 2.1% de arena gruesa, lo expuesto en la Gráfico N°1.

Gráfico N° 1. El relave presenta un diámetro de partícula D80 de 112.20 micras



Elaborado: Autora

Caracterización química

Los análisis químicos en la muestra PD-001 proveniente de la RCET nos indican la presencia de elementos mayores, menores y tierras raras, correspondiente a los valores detallados en la Tabla N° 1.

Estructuración de metadatos experimentales para procesos de geopolimerización aplicados a la sostenibilidad y reciclaje de relaves mineros

Tabla N° 1. Elementos químicos de la muestra PD-001

ELEMENTOS MENORES										
CÓDIGO: PD-001	Elemento	(mg/kg)	Elemento	(mg/kg)	Elemento	(mg/kg)	Elemento	(mg/kg)	Elemento	(mg/kg)
	Au	<15.00	Cd	44.61	K	12560.00	Pd	<8.00	Te	<38.00
	Ag	<12.50	Co	44.10	Mg	7750.00	Re	<50.00	Ti	1441.95
	Al	39570.00	Cr	97.85	Mn	1994.50	S	47030.00	Tl	<8.50
	As	319.60	Cs	<12.00	Mo	<10.00	Sb	82.36	V	112.93
	Ba	442.35	Cu	2122.50	Na	3385.50	Se	<20.00	W	380.00
	Be	<10.00	Fe	50380.00	Nb	<3.00	Sn	<10.00	Zn	3928.00
	Bi	<3.00	Hf	<50.00	Ni	<10.00	Sr	59.78	Zr	70.00
	Ca	34560.00	Hg	<8.00	Pb	1346.00	Ta	<8.00		
TIERRAS RARAS										
	ELEMENTO	(mg/kg)	ELEMENTO	(mg/kg)	ELEMENTO	(mg/kg)	ELEMENTO	(mg/kg)	ELEMENTO	(mg/kg)
	Ce	11.25	Ga	7.89	Lu	<0.04	Sc	8.50	Tm	0.07
	Dy	1.39	Gd	1.57	Nd	5.95	Sm	1.31	U	0.47
	Eu	0.57	Ho	0.24	Pr	1.47	Tb	0.17	Y	8.65
	Er	0.82	La	4.85	Rb	59.86	Th	<0.61	Yb	0.62
ELEMENTOS MAYORES										
	ELEMENTO	%	ELEMENTO	%	ELEMENTO	%	ELEMENTO	%	ELEMENTO	%
	Na₂O	0.35	SiO₂	65.09	SO₃	1.07	CaO	4.16	Mn₂O₃	0.25
	MgO	1.09	P₂O₅	0.05	K₂O	1.86	TiO₂	0.27	Fe₂O₃	6.59
	Al₂O₃	7.74								

Elaborado: Autora

Estructuración de metadatos experimentales para procesos de geopolimerización aplicados a la sostenibilidad y reciclaje de relaves mineros

Los valores resultantes son muy altos en Al, As, Ba, Pb, Cr, Cd, Cu, Hg, S, Ti, Zn y Fe, según la OMS (1993), esto indica que el material de relave se encuentra cargado de minerales pesados con potencial tóxico y que podrían ocasionar la producción de lixiviados peligrosos para el medio ambiente (Trueque, 1993a).

Ensayos de Lixiviación

En la Tabla N° 2 se muestran los resultados del test de lixiviación realizado a los morteros, separados por elementos mayores, elementos menores y metales pesados. Se puede observar contenidos altos de calcio en las muestras RCA y CE, las muestras RCC y GEO muestran contenidos altos en azufre así también en cuanto a los metales pesados analizados se indica presencia de aluminio y cromo en las cuatro mezclas.

Como limitante tenemos que no se analizó todos los elementos que podrían ser potencialmente peligrosos y que estaban presentes en el relave minero usado para las mezclas en estudio.

Tabla N° 2. Concentración de elementos macro, micro y metales pesados del ensayo de lixiviación

	NOMBRE MUESTRA	Ca mg/L	Mg mg/L	K mg/L	P mg/L	Fe mg/L
MACRO ELEMENTOS	RCA	137.21	BLD	20.83	0.56	BLD
	RCC	4.1	BLD	26.48	0.67	0.14
	GEO	10.13	0.55	16.03	4.01	4.82
	CE	343.69	BLD	10.71	0.6	BLD
	NOMBRE MUESTRA	Zn mg/L	Mn mg/L	Ni mg/L	Cu mg/L	S mg/L
MICRO ELEMENTOS	RCA	BLD	BLD	BLD	BLD	10.5
	RCC	BLD	BLD	BLD	0.06	315.43
	GEO	0.83	0.13	BLD	0.36	429.95
	CE	BLD	BLD	BLD	BLD	3.41
	NOMBRE MUESTRA	Al mg/L	Cd mg/L		Cr mg/L	
METALES PESADOS	RCA	0.52	BLD		0.76	BLD: Bajo el
	RCC	2.4	BLD		2.47	Límite de
	GEO	3.17	0.17		0.08	Detección
	CE	0.47	BLD		0.24	

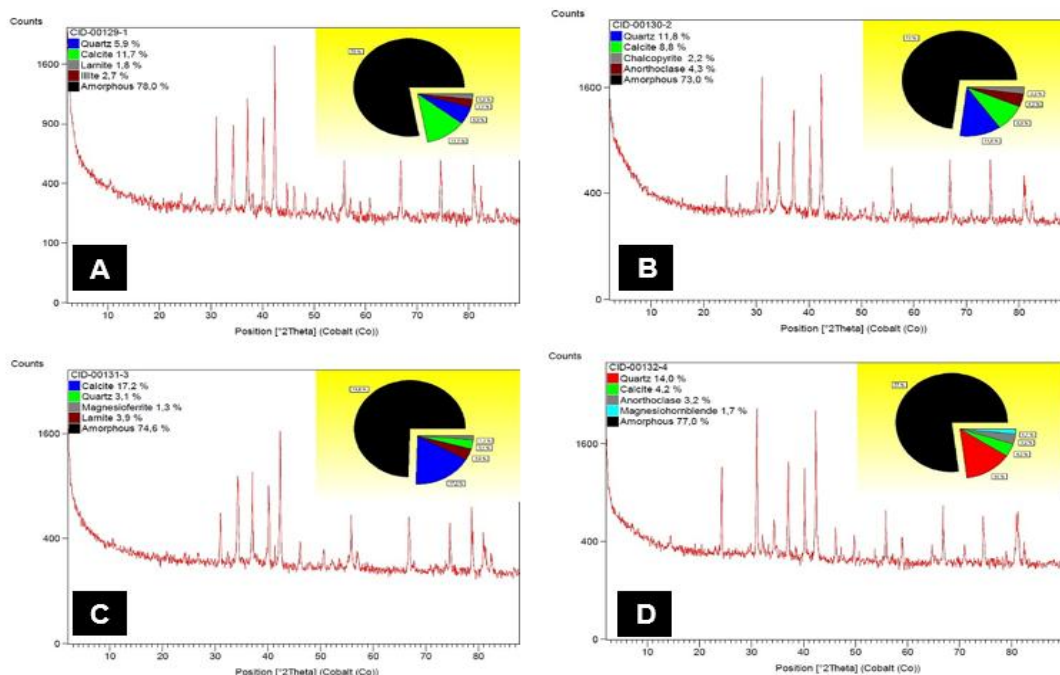
Elaborado: Autora

Caracterización del geopolímero

Las mezclas para ser ensayadas en el laboratorio fueron recodificadas, teniendo que, RCA-003 (CID-00129-1), RCC-002 (CID-00130-2), CE-004 (CID-00131-3) Y GEO- 001 (CID-00132-4).

En el análisis XRD Gráfico N° 2, podemos evidenciar que se ha formado una cantidad de amorfos (silicatos) sobre el 73% en las cuatro mezclas, al igual que silicatos de calcio (Lanita) y sodio (anortoclasas), el contenido de sílice varía entre 3.1% a 14% siendo relativamente inverso a la proporción de calcita que va de 4.2% a 17.2%, solo en dos muestras se han formado minerales magnésicos (horblendas) con porcentajes inferiores al 1.7%, la presencia de arcillas de tipo illitas se encuentran en la muestra CID-

Gráfico N° 2. Esquemas de difracción de rayos X



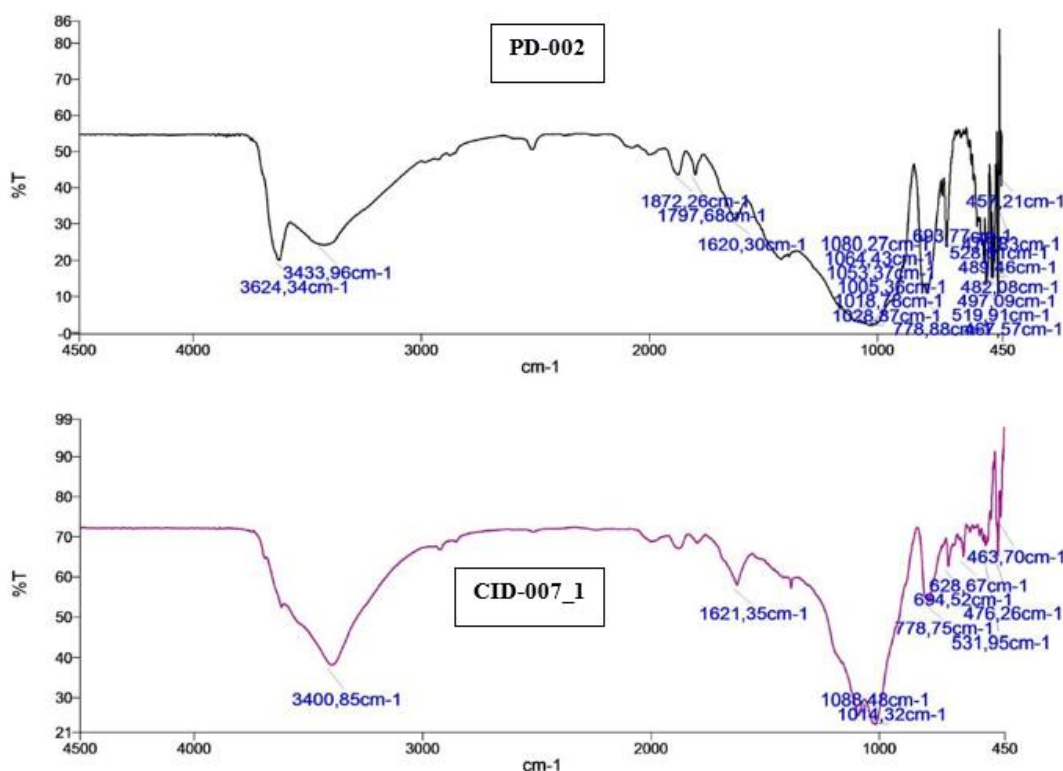
Elaborado: Autora

Por otro lado, mediante el análisis del FTIR podemos identificar que la diferencia de una curva a otra implica un cambio en la estructura molecular de los elementos. En ambos casos los rangos se centran en el desarrollo de enlaces más complejos como polímeros y compuestos carbonílicos. La muestra CID-007_1 es de la mezcla RCC y presenta un mayor estiramiento en comparación a la muestra original del relave PD-002 en la Gráfico N° 3.

Estructuración de metadatos experimentales para procesos de geopolimerización aplicados a la sostenibilidad y reciclaje de relaves mineros

La banda de 800 a 1600 cm^{-1} podría ser producto de una carbonatación tanto cálcica como sódica. Las vibraciones de 694 a 778 cm^{-1} se relacionan con la formación de silicatos o aluminatos tetraédricos y de 400 a 600 cm^{-1} estarían formándose compuestos de silicatos o aluminatos tetraédricos con características de gel CASH - hidrato de silicato de calcio- (el principal producto de reacción de la hidratación del cemento constituye más del 60% en volumen del cemento Portland hidratado y es responsable de la durabilidad y resistencia del concreto). La flexión de la muestra se encuentra en el rango de 450 a 1621 cm^{-1} con un 2.7% y en la muestra CID-00130-2 se identifica la formación de sulfuros en este caso calcopirita con 2.2%.

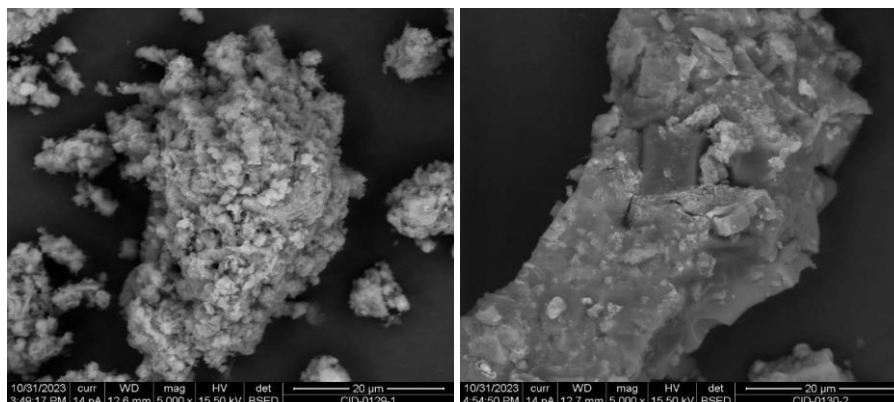
Gráfico N° 3. Esquemas de espectroscopia por infrarrojos



Elaborado: Autora

Finalmente, en las imágenes SEM figura 4 podemos apreciar las diferentes texturas de las redes cristalinas de los geopolímeros, en la muestra CID-0129-1 se observa un desarrollo homogéneo fino del aglutinante, en la muestra CID-0130-2 indica una fase sin reaccionar con un menor desarrollo del aglutinante, en las muestras CID-0131-3 y CID- 0132-4 la formación del aglutinante está desarrollada con tamaños mayores a la muestra CID-0129-1, pero existen fases sin reaccionar.

Gráfico N° 4. Imágenes SEM de las mezclas en base a RM



Elaborado: Autora

Discusión

Los resultados obtenidos permiten analizar la viabilidad del uso de geopolímeros como alternativa para la inmovilización de metales de transición presentes en los relaves de la Relavera Comunitaria El Tablón (RCET), lo cual responde directamente al objetivo central del estudio. La caracterización inicial evidenció un relave con concentraciones elevadas de elementos tóxicos como Fe, Cu, Zn, Pb, As, Cd y Cr. Este hallazgo confirma la problemática descrita en el marco teórico sobre los pasivos ambientales mineros y la necesidad de procesos de estabilización química que reduzcan su potencial de lixiviación (ASGMI, 2022; MAE, 2018).

La caracterización física mostró un material predominantemente fino y ácido, características típicas de relaves con susceptibilidad a procesos de drenaje ácido y movilización de metales. Esto coincide con estudios realizados en ambientes mineros tropicales, donde el tamaño fino y la composición sulfurosa contribuyen a la generación de acidez y lixiviación acelerada (Chang, 2017; Manaviparast et al., 2024). Tales condiciones refuerzan la pertinencia de evaluar procesos de geopolimerización como ruta de encapsulamiento, en línea con las experiencias desarrolladas en Perú, México y Chile, donde la activación alcalina de residuos aluminosilicatos ha mostrado capacidad para inmovilizar metales y generar materiales de valor agregado (Martínez, 2022; Yibran et al., 2021).

En este marco, las mezclas geopoliméricas producidas en este estudio exhibieron diferencias significativas tanto en su resistencia mecánica como en su capacidad de inmovilización. Las formulaciones RCC y CE alcanzaron resistencias comparables con el rango establecido por la NEC 2015 para hormigones estructurales, lo que implica una consolidación adecuada de las fases aluminosilicato-calcio y una red polimérica densa. Este comportamiento se alinea con los

Estructuración de metadatos experimentales para procesos de geopolimerización aplicados a la sostenibilidad y reciclaje de relaves mineros

planteamientos de Boskovic et al. (2024a) y Ren et al. (2024), quienes sostienen que la activación alcalina combinada con fuentes ricas en aluminosilicatos permite generar geles tipo N-A-S-H y C-A-S-H capaces de otorgar estabilidad mecánica y química a los materiales resultantes.

En contraste, las mezclas GEO y RCA presentaron valores de resistencia significativamente menores, lo que evidencia un grado más limitado de polimerización y uniones gelificadas menos consolidadas. Este comportamiento también se reflejó en los análisis SEM, donde se observaron fases sin reaccionar y estructuras menos homogéneas. Ello concuerda con la literatura que señala que la proporción de activadores y la disponibilidad de sílice y alúmina controlan la efectividad del proceso geopolimérico (ASGMI, 2022; Carvajal et al., 2022).

Respecto a la inmovilización de metales, los ensayos de lixiviación demostraron que todas las mezclas redujeron significativamente la movilidad de elementos como Cd, Ni, Cu, Zn y Cr, en comparación con los valores presentes en el relave original. En especial, las formulaciones CE y RCC mostraron menores concentraciones de metales en solución, lo que sugiere un encapsulamiento químico efectivo dentro de la matriz polimérica. Este resultado coincide con investigaciones previas que evidencian que redes ricas en geles C-A-S-H y estructuras amorfas de alta densidad son más eficientes para retener metales pesados mediante mecanismos de adsorción y oclusión (Morales Aranibar et al., 2025; Tian et al., 2022).

El análisis XRD refuerza esta interpretación al mostrar una fracción amorfa superior al 73% en todas las mezclas, condición considerada fundamental para el desarrollo de estructuras estables, amorfas y no cristalinas, típicamente asociadas a una inmovilización eficiente (Morales Aranibar et al., 2025). Asimismo, los espectros FTIR evidenciaron la formación de enlaces Si-O-Al y Si-O-Si, característicos de geopolímeros maduros, además de señales vinculadas a procesos de carbonatación que suelen aumentar la estabilidad superficial de la matriz.

Un aspecto relevante para la discusión es que, aunque la mezcla GEO presentó una menor resistencia mecánica, mostró bajos niveles de lixiviación de Cr, lo que sugiere que la eficacia de inmovilización no depende exclusivamente de la resistencia estructural, sino también de la composición química inicial y de los mecanismos de retención específicos de cada fase polimérica. Esto coincide con estudios experimentales Manaviparast et al. (2024) y Pacheco-Torgal et al. (2008) que indican que la inmovilización de metales responde a mecanismos multivariados, incluyendo atrapamiento físico, adsorción superficial y sustituciones isomórficas.

Finalmente, los resultados confirman que la geopolimerización es un proceso técnicamente viable para transformar relaves mineros del Distrito Zaruma–Portovelo en materiales más estables y con menor movilidad metálica, aportando una alternativa sostenible frente a la acumulación de pasivos ambientales. Esto es coherente con los principios de economía circular y con los esfuerzos internacionales por reincorporar residuos mineros a cadenas productivas, reduciendo riesgos ambientales y promoviendo soluciones de bajo costo y baja huella ecológica (MMSD, 2001).

Conclusiones

- Los resultados obtenidos demuestran que los relaves de la Relavera Comunitaria El Tablón presentan concentraciones elevadas de metales de transición y elementos tóxicos, lo que confirma su condición de pasivo ambiental con alto potencial de generación de lixiviados. Frente a esta problemática, las mezclas geopoliméricas elaboradas en el estudio evidenciaron una capacidad relevante para inmovilizar metales como Cr, Cd, Cu, Ni y Zn, reduciendo significativamente su movilidad en solución acuosa. La caracterización estructural mediante XRD, FTIR y SEM confirmó la formación de redes amorfas y geles aluminosilicato-cálcicos que contribuyen al encapsulamiento químico de los metales, demostrando que el proceso de geopolimerización es una ruta viable para la estabilización del relave estudiado.
- Asimismo, la resistencia mecánica alcanzada por las formulaciones RCC y CE se encuentra dentro del rango establecido por la NEC 2015, lo que indica que ciertos compuestos geopoliméricos derivados del relave pueden cumplir criterios de desempeño físico compatibles con el uso como materiales de construcción no estructural en entornos mineros. Este doble beneficio —estabilización ambiental y aprovechamiento productivo— posiciona a los geopolímeros como una alternativa sostenible frente a la acumulación y expansión de pasivos mineros en el Distrito Zaruma–Portovelo, alineándose con los principios de economía circular y con experiencias internacionales en reutilización de residuos mineros.
- Respecto a trabajos futuros, se recomienda ampliar la caracterización química considerando todos los metales presentes en el relave, así como evaluar la durabilidad de los geopolímeros bajo condiciones ambientales reales del trópico húmedo. Además, sería pertinente optimizar las proporciones de activadores alcalinos y explorar nuevas formulaciones que mejoren simultáneamente la resistencia mecánica y la capacidad de inmovilización. Se sugiere, también, realizar estudios piloto en campo para validar su desempeño en escenarios de

aplicación real y determinar su potencial como insumo para soluciones constructivas sostenibles en zonas mineras del Ecuador.

- Los resultados de este estudio deben interpretarse considerando ciertas limitaciones metodológicas y analíticas. En primer lugar, la caracterización química del relave no incluyó la totalidad de elementos potencialmente peligrosos presentes en la muestra original, debido a restricciones técnicas en los ensayos de laboratorio. Esto impide evaluar con completa precisión el grado de inmovilización global alcanzado por los geopolímeros. Asimismo, la granulometría fina y la heterogeneidad intrínseca de los relaves de la RCET, provenientes de diversas plantas de beneficio, podrían introducir variabilidad en los resultados que no fue posible controlar totalmente pese a la aplicación del método de cuarteo.

Referencias

1. ARCOM. (2019). Proyecto de seguimiento, control y evaluación de labores mineras en el distrito Zaruma–Portovelo. Ecuador.
2. ASGMI. (2022). Glosario técnico en materia de gestión de pasivos ambientales mineros.
3. BBC. (2019). Presa de Brumadinho en Brasil: ¿qué falló en el dique cuya ruptura ha dejado al menos 60 muertos y casi 300 desaparecidos?
4. Boskovic, I., Goranovic, S., Vukcevic, M., Kljajevic, L., Nenadovic, S., Ivanovic, M., & Gulicovski, J. (2024a). Red mud-fly ash-based geopolymers as an eco-friendly material for immobilization of toxic pollutants (Pb and Cu) from wastewater. *Science of Sintering*, 00, 24–24. <https://doi.org/10.2298/sos240220024b>
5. Boskovic, I., Goranovic, S., Vukcevic, M., Kljajevic, L., Nenadovic, S., Ivanovic, M., & Gulicovski, J. (2024b). Red mud-fly ash-based geopolymers as an eco-friendly material for immobilization of toxic pollutants (Pb and Cu) from wastewater. *Science of Sintering*, 00, 24–24. <https://doi.org/10.2298/sos240220024b>
6. Bravo, C. (2022). Relavera El Tablón. Prefectura de El Oro.
7. Carvajal, H., Teijeiro-Álvarez, M., García-Álvarez, M., & Vite, H. (2022). Modelo de gestión, de manejo de residuos sólidos urbanos en la provincia de el Oro, Ecuador. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(6), 314–321.
<https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/download/3379/3315/6631>

8. Chang, R. (2017). Síntesis y caracterización de hormigones de Geopolímeros a partir de zeolitas naturales. <https://www.fict.espol.edu.ec/sites/fict.espol.edu.ec/files/CHANG.pdf>
9. Fonseca Alfonso, P. M., Díaz Lagos, M., & Murillo, E. A. (2024). Immobilization of Pb²⁺, CrO₄²⁻, Hg²⁺, and Cd²⁺ in Coal Fly Ash/PP-g-MHBP-Based Geopolymers. *Journal of Composites Science*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/jcs8120528>
10. Genua, F., Lancellotti, I., & Leonelli, C. (2025). Geopolymer-Based Stabilization of Heavy Metals, the Role of Chemical Agents in Encapsulation and Adsorption: Review. In *Polymers* (Vol. 17, Issue 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym17050670>
11. González-Sánchez, M., León-Bassantes, L., & Peñafiel-Cox, M. (2023). La economía circular como nuevo modelo de negocio empresarial. *Revista Científica Arbitrada de Investigación En Comunicación, Marketing y Empresa*, 6(12), 118–131. <https://doi.org/10.46296/rc.v6i12.0146>
12. Gupta, P., Nagpal, G., & Gupta, N. (2021). Fly ash-based geopolymers: an emerging sustainable solution for heavy metal remediation from aqueous medium. In *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* (Vol. 10, Issue 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1186/s43088-021-00179-8>
13. Ivanović, M., Knežević, S., Radović, I., Kljajević, L., Mirković, M., Nenadović, M., & Nenadović, S. (2023). Preparation and Characterization of Geopolymers Based on Metakaolin with the Addition of Organic Phase PVA. *Sustainability* (Switzerland), 15(5). <https://doi.org/10.3390/su15054441>
14. MAE. (2018). Ley de Minería. www.lexis.com.ec
15. Mahfoud, E., Maherzi, W., Ndiaye, K., Abriak, N. E., Aggoun, S., & Benzerzour, M. (2024). One-part geopolymer based on micronized sediments and fly ash mix: Mechanical, microstructural and leaching assessment. *Journal of Building Engineering*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110426>
16. Manaviparast, H. R., Miranda, T., Pereira, E., & Cristelo, N. (2024). A Comprehensive Review on Mine Tailings as a Raw Material in the Alkali Activation Process. In *Applied Sciences* (Switzerland) (Vol. 14, Issue 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/app14125127>
17. Martínez, G. (2022). Geopolímeros y sus aplicaciones. TecNM Celaya.

18. MMSD. (2001). Abriendo Brecha Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable. Earthscan Publications Ltd.
19. Mohammad, N. (2000). Metodología de la investigación.
20. Morales Aranibar, C. G., La Rosa Toro Gómez, A., da Silva, J. L., Morales-Aranibar, L., & Arán, D. (2025). Reuse of Mine Tailings Through Geopolymerization Applied to 3D Printing: A Review of Progress, Challenges and Perspectives. In Sustainability (Switzerland) (Vol. 17, Issue 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/su17062617>
21. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. P., & Jalali, S. (2008). Investigations of tungsten mine waste geopolymeric binder: Strength and microstructure. Construction and Building Materials, 22(11), 2212–2219. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.003>
22. Paz-Gómez, D. C., Vilarinho, I. S., Pérez-Moreno, S. M., Carvalheiras, J., Guerrero, J. L., Novais, R. M., Seabra, M. P., Ríos, G., Bolívar, J. P., & Labrincha, J. A. (2021a). Immobilization of hazardous wastes on one-part blast furnace slag-based geopolymers. Sustainability (Switzerland), 13(23). <https://doi.org/10.3390/su132313455>
23. Paz-Gómez, D. C., Vilarinho, I. S., Pérez-Moreno, S. M., Carvalheiras, J., Guerrero, J. L., Novais, R. M., Seabra, M. P., Ríos, G., Bolívar, J. P., & Labrincha, J. A. (2021b). Immobilization of hazardous wastes on one-part blast furnace slag-based geopolymers. Sustainability (Switzerland), 13(23). <https://doi.org/10.3390/su132313455>
24. Perná, I., Havelcová, M., Šupová, M., Žaloudková, M., & Bičáková, O. (2024). The Synthesis and Characterization of Geopolymers Based on Metakaolin and on Automotive Glass Waste. Applied Sciences (Switzerland), 14(8). <https://doi.org/10.3390/app14083439>
25. Pratt, W., & Figueroa, J. (1997). Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 3- 4o S, Proyecto de Desarrollo minero y control ambiental, Programa de información cartográfica y geológica. Quito.
26. Ren, X., Wang, F., He, X., & Hu, X. (2024). The Effect of CaO in the Immobilization of Cd²⁺ and Pb²⁺ in Fly Ash-Based Geopolymer. Clean Technologies, 6(3), 1057–1075.
<https://doi.org/10.3390/cleantechnol6030053>
27. Rožek, P., Florek, P., Król, M., & Mozgawa, W. (2021). Immobilization of heavy metals in boroaluminosilicate geopolymers. Materials, 14(1), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/ma14010214>

Estructuración de metadatos experimentales para procesos de geopolimerización aplicados a la sostenibilidad y reciclaje de relaves mineros

28. Tian, Q., Bai, Y., Pan, Y., Chen, C., Yao, S., Sasaki, K., & Zhang, H. (2022). Application of Geopolymer in Stabilization/Solidification of Hazardous Pollutants: A Review. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 14). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules27144570>
29. Yibran, A. H., Nan, Z., & Figueroa, L. (2021). Conversión de relaves mineros en materiales geopoliméricos aditivados con nanopartículas de hidróxido de calcio_ estudios preli - Revista Minería.
30. Zúñiga, N. C., & Picado, D. R. (2022). Evaluación de muestras del agregado grueso proveniente de residuos de concreto para producir nuevos concretos. *Métodos & Materiales*, 12, 1–11. <https://doi.org/10.15517/mym.v12i0.48029>

©2026 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).|