



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i4.4636>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

Optimization of geopolymer formulations from mining tailings to improve mechanical strength and metal immobilization

Otimização de formulações de geopolímeros a partir de resíduos de mineração para melhorar a resistência mecânica e a imobilização de metais

Katherine Michelle Diaz Medina ^I

michelle.diaz@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-4846-157X>

Correspondencia: michelle.diaz@epoch.edu.ec

***Recibido:** 30 de octubre de 2025 ***Aceptado:** 26 de noviembre de 2025 *** Publicado:** 25 de diciembre de 2025

- 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.

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

Resumen

La actividad minera en el sur del Ecuador ha generado grandes volúmenes de relaves que, al ser dispuestos de manera antitécnica, constituyen pasivos ambientales con alto potencial de contaminación por metales de transición. En este contexto, la geopolimerización se presenta como una alternativa alineada con los principios de economía circular, al permitir la valorización de estos residuos mediante su transformación en materiales más estables y con aplicaciones potenciales en el sector de la construcción. El objetivo de esta investigación fue evaluar comparativamente el desempeño mecánico y la estabilidad química de diferentes formulaciones geopoliméricas elaboradas a partir de relaves mineros de la Relavera Comunitaria El Tablón.

La metodología incluyó la caracterización física, química y mineralógica del relave, la elaboración de probetas con distintas formulaciones, ensayos de resistencia a la compresión, pruebas de lixiviación y análisis microestructurales mediante XRD, FTIR y SEM. Los resultados mostraron que las formulaciones RCC y CE alcanzaron resistencias mecánicas compatibles con la Norma Ecuatoriana de la Construcción, mientras que la mezcla CE presentó una menor liberación de aluminio y cromo en los ensayos de lixiviación. La caracterización microestructural evidenció la formación de matrices geopoliméricas con alta fracción amorfa, aunque con diferencias en el grado de reacción entre formulaciones. Se concluye que la geopolimerización de relaves mineros es una alternativa técnicamente viable para su valorización, siempre que la selección de mezclas considere de manera conjunta criterios mecánicos, químicos y microestructurales.

Palabras Claves: Geopolímeros; relaves mineros; economía circular; inmovilización de metales; minería sostenible.

Abstract

Mining activity in southern Ecuador has generated large volumes of tailings which, when disposed of improperly, constitute environmental liabilities with a high potential for contamination by transition metals. In this context, geopolymerization emerges as an alternative aligned with the principles of a circular economy, allowing for the valorization of these wastes through their transformation into more stable materials with potential applications in the construction sector. The objective of this research was to comparatively evaluate the mechanical performance and chemical stability of different geopolymer formulations made from mining tailings from the El Tablón Community Tailings Dam.

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

The methodology included the physical, chemical, and mineralogical characterization of the tailings, the preparation of specimens with different formulations, compressive strength tests, leaching tests, and microstructural analyses using XRD, FTIR, and SEM. The results showed that the RCC and CE formulations achieved mechanical strengths compatible with the Ecuadorian Construction Standard, while the CE mixture exhibited lower aluminum and chromium release in the leaching tests. Microstructural characterization revealed the formation of geopolymer matrices with a high amorphous fraction, although with differences in the degree of reaction between formulations. It is concluded that the geopolymerization of mining tailings is a technically viable alternative for their valorization, provided that the selection of mixtures considers mechanical, chemical, and microstructural criteria together..

Keywords: Geopolymers; mining tailings; circular economy; metal immobilization; sustainable mining.

Resumo

A atividade mineira no sul do Equador gerou grandes volumes de resíduos que, quando descartados de forma inadequada, constituem passivos ambientais com elevado potencial de contaminação por metais de transição. Neste contexto, a geopolimerização surge como uma alternativa alinhada com os princípios da economia circular, permitindo a valorização destes resíduos através da sua transformação em materiais mais estáveis com potenciais aplicações no setor da construção civil. O objetivo desta investigação foi avaliar comparativamente o desempenho mecânico e a estabilidade química de diferentes formulações de geopolímeros produzidas a partir de rejeitos da barragem de rejeitos da comunidade de El Tablón.

A metodologia incluiu a caracterização física, química e mineralógica dos rejeitos, a preparação de provetes com diferentes formulações, ensaios de resistência à compressão, ensaios de lixiviação e análises microestruturais através de DRX, FTIR e MEV. Os resultados mostraram que as formulações RCC e CE atingiram resistências mecânicas compatíveis com a Norma Equatoriana de Construção, enquanto a mistura CE apresentou menor libertação de alumínio e cromo nos ensaios de lixiviação. A caracterização microestrutural revelou a formação de matrizes geopoliméricas com elevada fracção amorfa, embora com diferenças no grau de reacção entre formulações. Conclui-se que a geopolimerização de resíduos de mineração é uma alternativa tecnicamente viável para a sua

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

valorização, desde que a seleção das misturas considere critérios mecânicos, químicos e microestruturais em conjunto..

Palavras-chave: Geopolímeros; resíduos de mineração; economia circular; imobilização de metais; mineração sustentável.

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).

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). 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 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.

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

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).

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).

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).

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

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

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).

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).

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

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

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. Evaluar comparativamente el desempeño mecánico y la estabilidad química de diferentes formulaciones geopoliméricas elaboradas a partir de relaves mineros de la Relavera Comunitaria El Tablón, con el fin de identificar aquellas mezclas que ofrecen el mejor equilibrio entre resistencia a la compresión e inmovilización de metales de transición.

Metodología

La investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental orientado a la optimización de mezclas geopoliméricas elaboradas a partir de relaves mineros provenientes de la Relavera Comunitaria El Tablón (RCET), en el distrito minero Zaruma–Portovelo. El estudio se estructuró para analizar el efecto de distintas formulaciones sobre el desempeño mecánico y la capacidad de inmovilización de metales de transición, con el fin de identificar composiciones técnicamente más eficientes para su potencial aplicación en entornos mineros.

El relave minero fue recolectado de la RCET y sometido a procesos de disgregación mecánica, secado y homogenización. Para garantizar representatividad se aplicó el método de cuarteo, obteniendo submuestras destinadas a la fabricación de especímenes. Las mezclas se diseñaron variando el tipo de ligante (cementante y geopolimérico), la proporción de relave como sustituto de agregado fino, y la relación solución/aglutinante. Las formulaciones se codificaron y prepararon con tres réplicas por condición experimental.

Las probetas, de geometría cúbica de 50 mm de arista, se moldearon siguiendo la norma ASTM C109, aplicando un curado térmico inicial y posterior curado ambiental. El desempeño mecánico se evaluó mediante ensayos de resistencia a la compresión, cuyos resultados se compararon con rangos de referencia establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015).

Para analizar la capacidad de inmovilización, los fragmentos resultantes de los ensayos mecánicos fueron sometidos a pruebas de lixiviación en condiciones controladas, utilizando una relación líquida/sólido constante y tiempos de agitación definidos. Las soluciones lixiviadas se analizaron para

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

cuantificar la liberación de metales de transición críticos. De forma complementaria, se realizaron análisis microestructurales y mineralógicos mediante XRD, FTIR y SEM, con el propósito de interpretar los mecanismos responsables del desempeño observado.

Finalmente, los resultados mecánicos, químicos y microestructurales se integraron en un análisis comparativo, permitiendo establecer un criterio de selección de mezclas óptimas basado en el equilibrio entre estabilidad estructural y eficiencia de inmovilización metálica.

Resultados

Caracterización del relave minero

La caracterización del relave proveniente de la Relavera Comunitaria El Tablón permitió establecer las condiciones iniciales del material empleado como precursor en las mezclas geopoliméricas. En términos físicos, la muestra PD-001 presentó una densidad real de 3.1 g/cm^3 y una densidad aparente de 2.26 g/cm^3 , valores coherentes con la elevada presencia de minerales metálicos y sulfuros reportados en la caracterización química. El pH medido (6.54) indica un material ligeramente ácido, cercano a la neutralidad, lo que sugiere un comportamiento geoquímico moderado previo a la activación alcalina.

El análisis granulométrico evidenció un predominio de partículas finas, con un D80 de $112.20 \mu\text{m}$, y una alta proporción de arenas muy finas en el rango de $90\text{--}150 \mu\text{m}$. Esta distribución granulométrica favorece la reactividad del material durante los procesos de activación y geopolimerización, al incrementar el área superficial disponible para las reacciones químicas.

Distribución granulométrica del relave y D80

Desde el punto de vista químico, los resultados muestran concentraciones elevadas de Al, Fe, As, Pb, Cd, Cu, Zn y S, además de contenidos significativos de SiO_2 (65.09%) y Al_2O_3 (7.74%), componentes clave para la formación de redes aluminosilicáticas. No obstante, la presencia de metales potencialmente tóxicos confirma el carácter ambientalmente riesgoso del relave en su estado original, justificando la necesidad de procesos de estabilización e inmovilización.

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

Tabla N° 1

Elementos químicos de la muestra PD-001

ELEMENTOS MENORES										
CÓDIGO: PD-001	ELEME NT O	(mg/k g)	ELEME NT O	(mg/k g)	ELEME NT O	(mg/k g)	ELEME NT O	(mg/k g)	ELEME NT O	(mg/ kg)
	Au	<15.0 0	Cd	44.61	K	12560 .0 0	Pd	<8.00	Te	<38.0 0
	Ag	<12.5 0	Co	44.10	Mg	7750. 00	Re	<50.0 0	Ti	1441. 9 5
	Al	39570 .0 0	Cr	97.85	Mn	1994. 50	S	47030 .0 0	Tl	<8.50
	As	319.6 0	Cs	<12.0 0	Mo	<10.0 0	Sb	82.36	V	112.9 3
	Ba	442.3 5	Cu	2122. 50	Na	3385. 50	Se	<20.0 0	W	380.0 0
	Be	<10.0 0	Fe	50380 .0 0	Nb	<3.00	Sn	<10.0 0	Zn	3928. 0 0
	Bi	<3.00	Hf	<50.0 0	Ni	<10.0 0	Sr	59.78	Zr	70.00
	Ca	34560 .0 0	Hg	<8.00	Pb	1346. 00	Ta	<8.00		
	TIERRAS RARAS									

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

ELEME NT O	(mg/k g)	ELEME NT O	(mg/k g)	ELEME NT O	(mg/k g)	ELEME NT O	(mg/k g)	ELEME NT O	(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									
ELEME NT O	%	ELEME NT O	%	ELEME NT O	%	ELEME NT O	%	ELEME NT O	%
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: Autor

Resistencia mecánica de las mezclas

Los resultados de los ensayos de compresión simple a los siete días de curado muestran diferencias claras entre las formulaciones evaluadas. Como se observa en la Tabla 2, las mezclas RCC y CE alcanzaron resistencias corregidas de 30.56 MPa y 28.61 MPa, respectivamente, ubicándose dentro del rango exigido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-HM, 2015) para hormigón normal y liviano. En contraste, las mezclas GEO (12.29 MPa) y RCA (14.72 MPa) no alcanzaron los valores mínimos normativos.

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

Tabla N° 2

Comparación de resistencia de especímenes ensayados con valores de la NEC-SE-HM de 2015

CÓDIGO	COMPRESIÓN	CORRECCIÓN	NEC-	COMPRESIÓN	CONCRETO
MEZCLA	MPa	2015 MPa		SUGÚN NEC-2015	
GEO	5.29	12.29		21 – 35	
RCC	22.06	30.56		21 - 35	
RCA	7.72	14.72		21 - 35	
CE	20.11	28.61		21 - 35	

Elaborado: Autor

Este comportamiento evidencia que la incorporación de cemento y/o activadores alcalinos adecuados favorece el desarrollo de una matriz más resistente, mientras que las formulaciones con mayor proporción de relave y menor contenido cementante presentan limitaciones estructurales. No obstante, las resistencias alcanzadas por GEO y RCA podrían ser suficientes para aplicaciones no estructurales, como rellenos estabilizados o elementos secundarios en zonas mineras.

Ensayos de lixiviación

El ensayo de lixiviación permitió evaluar la estabilidad química de las matrices formadas y su capacidad para inmovilizar metales presentes en el relave. Los resultados, presentados en la Tabla 3, muestran que todas las mezclas liberan concentraciones variables de macroelementos y metales de transición, siendo el calcio y el azufre los elementos mayoritarios en solución

Tabla N° 3

Concentración de elementos macro, micro y metales pesados del ensayo de lixiviación

	NOMBRE	Ca	Mg	K	P	Fe
	MUESTRA	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
MACRO	RCA	137.21	BLD	20.83	0.56	BLD
ELEMENTOS	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
		Zn	Mn	Ni	Cu	S

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

	NOMBRE	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	MUESTRA					
MICRO	RCA	BLD	BLD	BLD	BLD	10.5
ELEMENTOS	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	Al	Cd		Cr	
	MUESTRA	mg/L	mg/L		mg/L	
METALES	RCA	0.52	BLD		0.76	BLD: Bajo el
PESADOS	RCC	2.4	BLD		2.47	Límite de
	GEO	3.17	0.17		0.08	Detección
	CE	0.47	BLD		0.24	

Elaborado: Autor

Desde una perspectiva ambiental, se observa que las mezclas CE y RCA presentan las concentraciones más bajas de aluminio y cromo, mientras que RCC y GEO muestran valores superiores, particularmente en aluminio. La detección de cadmio únicamente en la mezcla GEO sugiere una menor eficiencia de inmovilización para esta formulación, posiblemente asociada a una activación incompleta o a la presencia de fases sin reaccionar.

Estos resultados indican que, si bien todas las formulaciones reducen la movilidad de los metales respecto al relave original, existen diferencias relevantes en la eficiencia de inmovilización, las cuales deben considerarse juntamente con el desempeño mecánico para definir su viabilidad de uso.

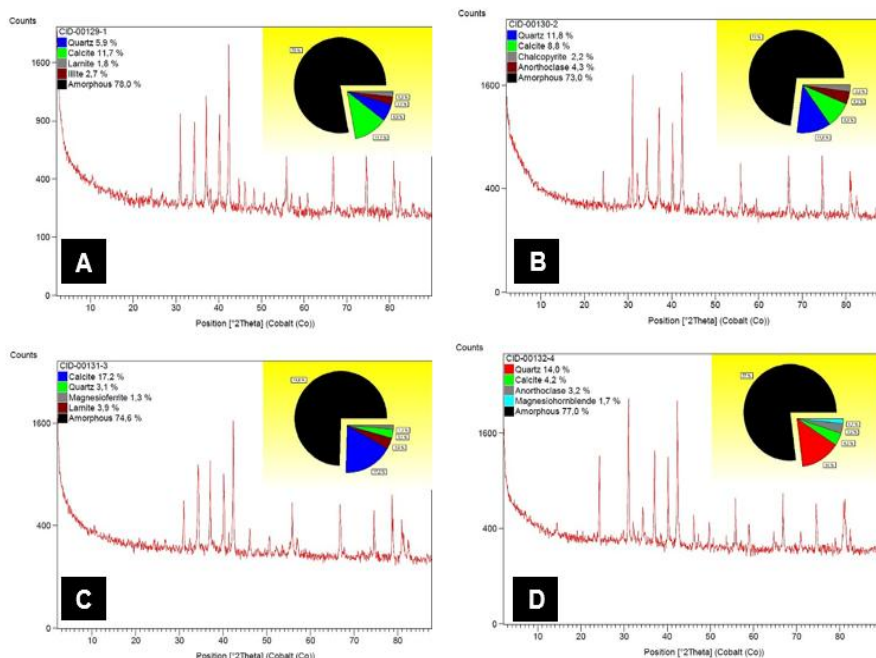
Caracterización del geopolímero

El análisis mineralógico mediante XRD evidenció la formación de una fracción amorfa superior al 73% en todas las mezclas, lo que confirma el desarrollo de fases geopoliméricas. Asimismo, se identificaron silicatos de calcio y sodio, así como variaciones en el contenido de sílice y calcita entre las formulaciones, reflejando diferencias en el grado de reacción y en la composición final de la matriz.

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

Figura N° 1

Esquemas de difracción de rayos X



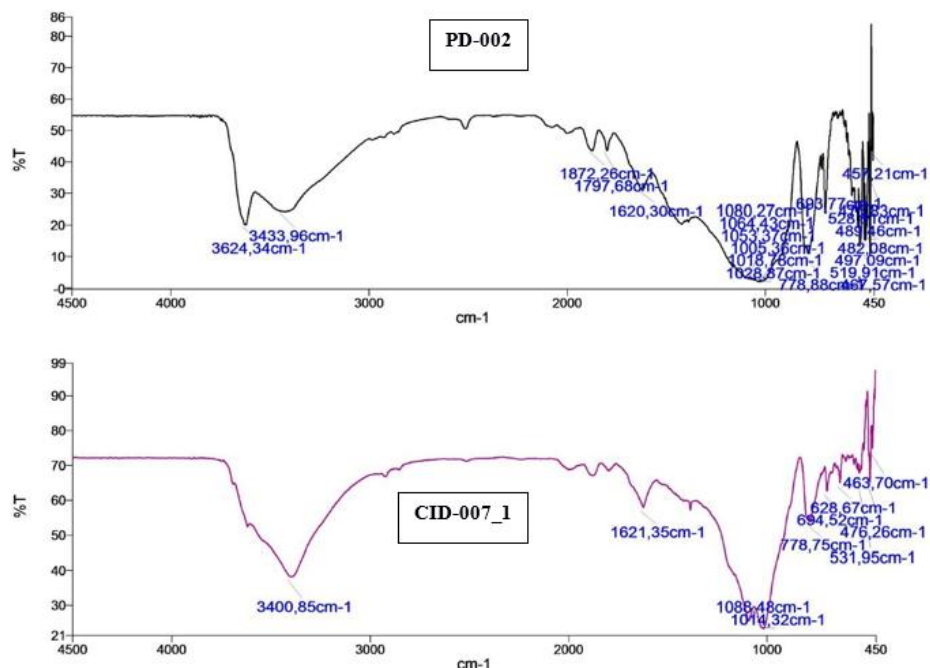
Elaborado: Autor

Por otro lado, en la Figura N° 2, el análisis FTIR mostró bandas características asociadas a enlaces Si–O–Si y Si–O–Al, así como señales atribuibles a la formación de geles tipo C–A–S–H, responsables de la resistencia y durabilidad del material. Estas evidencias confirman la reorganización estructural del relave tras el proceso de activación.

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

Figura N° 2

Esquemas de espectroscopia por infrarrojos



Elaborado: Autor

Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la geopolimerización de relaves mineros constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente pertinente para la gestión de pasivos ambientales asociados a la minería aurífera en el distrito Zaruma–Portovelo. Tal como señalan MMSD (2001) y Carvajal et al. (2022), la minería puede generar beneficios económicos relevantes siempre que sus impactos ambientales sean adecuadamente gestionados; sin embargo, en contextos donde predominan prácticas tradicionales, como en el sur del Ecuador, los relaves representan una fuente persistente de contaminación hídrica y edáfica. En este sentido, los altos contenidos de metales potencialmente tóxicos identificados en el relave original refuerzan la urgencia de implementar procesos de estabilización que reduzcan su peligrosidad.

Desde una perspectiva de economía circular, los resultados respaldan la valorización de relaves como materia prima para la fabricación de materiales alternativos, alineándose con experiencias internacionales reportadas en Perú, México y Chile (Yibran et al., 2021; Martínez, 2022; González-Sánchez et al., 2023). La capacidad de los geopolímeros para transformar un residuo ambientalmente

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

problemático en un material con propiedades mecánicas aprovechables refuerza su potencial como tecnología de cierre y remediación minera. No obstante, los resultados evidencian que no todas las formulaciones presentan el mismo desempeño, lo que subraya la importancia de una evaluación comparativa y no meramente exploratoria.

En términos mecánicos, las formulaciones RCC y CE mostraron resistencias a la compresión compatibles con los rangos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción, lo cual coincide con lo reportado en la literatura sobre geopolímeros activados alcalinamente con presencia de calcio (Davidovits, 1994; Boskovic et al., 2024b). Este comportamiento se asocia a una mayor formación de fases tipo gel y a una matriz más densa, capaz de soportar cargas mecánicas moderadas. Por el contrario, las mezclas con mayor proporción de relave y menor contenido cementante, como GEO y RCA, evidenciaron limitaciones estructurales, aunque sus resistencias podrían ser suficientes para aplicaciones no estructurales, como rellenos estabilizados o elementos secundarios en zonas mineras.

La evaluación de la estabilidad química mediante ensayos de lixiviación aporta un criterio ambiental fundamental que complementa el análisis mecánico. Si bien todas las formulaciones reducen la movilidad de los metales respecto al relave original, se observaron diferencias relevantes entre mezclas. La menor liberación de aluminio y cromo en las formulaciones CE y RCA sugiere una inmovilización más eficiente de metales de transición, mientras que las concentraciones más elevadas observadas en RCC y GEO indican que una mayor resistencia mecánica no siempre se traduce en una mayor estabilidad química. Este resultado coincide con estudios previos que advierten sobre la necesidad de evaluar simultáneamente propiedades mecánicas y ambientales para evitar soluciones técnicamente robustas, pero químicamente inestables (Gupta et al., 2021; Ivanović et al., 2023).

La caracterización microestructural y mineralógica permite explicar estas diferencias de comportamiento. La elevada fracción amorfa identificada por XRD en todas las mezclas confirma el avance del proceso de geopolimerización, en concordancia con lo descrito por Manaviparast et al. (2024). Sin embargo, la presencia de fases secundarias, como calcita, silicatos de calcio y remanentes de sulfuros, así como la observación de fases sin reaccionar en SEM, evidencia que el grado de reacción no es homogéneo entre formulaciones. Estas heterogeneidades microestructurales influyen directamente tanto en la resistencia mecánica como en la capacidad de encapsulación de metales, tal como lo han señalado Morales Aranibar et al. (2025) y Zúñiga y Picado (2022).

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

En el contexto específico del distrito Zaruma–Portovelo, donde la Relavera Comunitaria El Tablón se encuentra cercana a su capacidad máxima (ARCOM, 2019; Bravo, 2022), los resultados adquieren una relevancia adicional. La posibilidad de reducir el volumen de relaves mediante su transformación en materiales estabilizados no solo contribuye a mitigar riesgos ambientales, como los asociados a procesos de lixiviación o inestabilidad física, sino que también se alinea con lecciones aprendidas a nivel internacional tras eventos catastróficos como el colapso de Brumadinho (BBC, 2019). En este sentido, la geopolimerización se posiciona como una alternativa preventiva, orientada a la seguridad y a la sostenibilidad a largo plazo.

Finalmente, los resultados de este estudio refuerzan la idea de que la selección de formulaciones geopoliméricas debe basarse en un enfoque integral que considere simultáneamente resistencia, estabilidad química y microestructura. La identificación de mezclas con mejor equilibrio entre estos criterios responde directamente al objetivo planteado y aporta evidencia experimental relevante para el desarrollo de estrategias de valorización de relaves en Ecuador. Asimismo, el trabajo pone de manifiesto la necesidad de continuar avanzando hacia la estandarización y documentación rigurosa de los datos experimentales, condición indispensable para garantizar la reproducibilidad, escalabilidad y transferencia de estas tecnologías, tal como lo señalan Fonseca Alfonso et al. (2024).

Conclusiones

- Los resultados de esta investigación confirman que la geopolimerización de relaves mineros provenientes de la Relavera Comunitaria El Tablón constituye una alternativa técnicamente viable para la valorización de pasivos ambientales asociados a la minería aurífera en el distrito Zaruma–Portovelo. La caracterización inicial del relave evidenció altos contenidos de sílice y alúmina, así como la presencia de metales potencialmente tóxicos, condiciones que, si bien representan un riesgo ambiental en su estado original, también favorecen su uso como precursor en procesos de activación alcalina.
- El análisis comparativo de las formulaciones geopoliméricas permitió identificar diferencias significativas en el desempeño mecánico y la estabilidad química. Las mezclas RCC y CE alcanzaron resistencias a la compresión compatibles con los rangos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción, mientras que las formulaciones con mayor proporción de relave presentaron limitaciones estructurales. No obstante, los ensayos de lixiviación mostraron que la eficiencia de inmovilización de metales no depende exclusivamente de la

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

resistencia mecánica, destacándose la mezcla CE por presentar una menor liberación de aluminio y cromo, lo que evidencia un mejor equilibrio entre desempeño estructural y estabilidad química.

La caracterización microestructural mediante XRD, FTIR y SEM respaldó estos hallazgos, al evidenciar la formación de matrices geopoliméricas con alta fracción amorfa, aunque con grados variables de reacción y presencia de fases residuales. En conjunto, los resultados permiten concluir que la selección de formulaciones geopoliméricas para la valorización de relaves mineros debe basarse en un enfoque integral, que considere simultáneamente criterios mecánicos, químicos y microestructurales. Este estudio aporta evidencia experimental relevante para el desarrollo de estrategias sostenibles de gestión de relaves en Ecuador y sienta bases técnicas para futuras aplicaciones en contextos mineros con problemáticas ambientales similares.

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

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*

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

- 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. 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>
16. Martínez, G. (2022). Geopolímeros y sus aplicaciones. TecNM Celaya.
17. MMSD. (2001). Abriendo Brecha Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable. Earthscan Publications Ltd.
18. 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>
19. 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. (2021). Immobilization of hazardous wastes on one-part blast furnace slag-based geopolymers. Sustainability (Switzerland), 13(23). <https://doi.org/10.3390/su132313455>
20. 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.

Optimización de formulaciones geopoliméricas a partir de relaves mineros para mejorar la resistencia mecánica y la inmovilización de metales

21. 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>
22. 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.
23. 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>

©2025 por los autores. 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/>).|