

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

Unidad de Posgrado de Ingeniería y Arquitectura



Propuesta metodológica para determinar la representatividad espacial y cantidad óptima de puntos de muestreo en verificación de estabilidad geoquímica a proyectos mineros del Perú.

Trabajo de Investigación para obtener el Grado Académico de Maestro(a) en Maestría en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sostenible

Autores:

Soledad Torres Calderón
Jose Carlos Farfan Meza

Asesor:

Dr. Javier Linkolk López-Gonzales

Lima, 09 de marzo del 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Yo, Javier Linkolk López-Gonzales, docente de la Unidad de Posgrado de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Posgrado de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR LA REPRESENTATIVIDAD ESPACIAL Y CANTIDAD ÓPTIMA DE PUNTOS DE MUESTREO EN VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD GEOQUÍMICA A PROYECTOS MINEROS DEL PERÚ”** de los autores Soledad Torres Calderón y Jose Carlos Farfan Meza, tiene un índice de similitud de 10 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 08 días del mes de julio del año 2026



Javier Linkolk López-Gonzales

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Lima, Naña, Villa unión a los 09 días del mes de marzo del año 2026, siendo las 15:00 horas, se reunieron de forma online sincrónica, bajo la dirección de la presidente del jurado Mg. Lizeth Geanina Huanca López, el secretario Mtro. Carlos Daniel Abanto Ramírez; los demás miembros: Dr. Alex Rubén Huamán De la Cruz, el Mg. Junior Israel Pacheco Espinoza y el asesor PhD. Javier Linkolk López Gonzales, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de Trabajo de investigación titulada "Propuesta metodológica para determinar la representatividad espacial y cantidad óptima de puntos de muestreo en verificación de estabilidad geoquímica a proyectos mineros del Perú" conducente a la obtención del Grado Académico de Maestro en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sostenible.

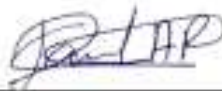
La presidente inició el acto académico de sustentación invitando a los candidatos hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluido la exposición, la presidente invitó a los demás miembros del Jurado a efectuar las preguntas, cuestionamientos y aclaraciones pertinentes, los cuales fueron absueltos por los candidatos, luego se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del Jurado. Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidatos: Soledad Torres Calderón y José Carlos Farfán Meza

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	19	A-	Excelente	Excelencia

Finalmente, la Presidente del Jurado invitó a los candidatos para recibir la evaluación final. Además, la Presidente del jurado condujo el acto académico de sustentación, procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente



Secretario

Asesor(a)

Miembro

Miembro

Candidato

Candidato

Propuesta metodológica para determinar la representatividad espacial y cantidad óptima de puntos de muestreo en verificación de estabilidad geoquímica a proyectos mineros del Perú.

Methodological Proposal to Determine Spatial Representativeness and the Optimal Number of Sampling Points for Geochemical Stability Verification in Mining Projects in Peru.

Soledad Torres Calderón¹, José Carlos Farfán Meza^{2*}, Javier Linkolk López-Gonzales^{3*}

¹ Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.

² Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.

³ Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.

Resumen

Actualmente en Perú no existe una metodología estandarizada para determinar la cantidad de puntos de muestreo (calicatas) óptimos para verificar el cumplimiento de obligaciones fiscalizables de estabilidad geoquímica en componentes críticos de la etapa de cierre de proyectos mineros, tales como depósitos de relaves, botaderos de desmonte, tajos, pads de lixiviación, entre otros. El estudio propone una metodología para determinar la representatividad espacial y cantidad óptima de puntos de muestreo para poblaciones finitas y análisis de variabilidad espacial, aplicada a 23 componentes mineros cerrados con áreas entre 0.038 ha (384.38 m²) y 66 hectáreas (ha). Se evaluó la viabilidad estadística de una grilla base de una (1) calicata por cada 5,000 m² (0.5 ha) -considerada criterio de experto-, ajustada mediante diseño factorial 2² con 2 puntos centrales y Diseño Experimental a un nivel de confianza del 95%. En el estudio de la fórmula geoestadística (N), se determinó que una 1 calicata/5,000 m² (0,5 ha) se ajusta para aplicar la fórmula de tamaño de muestra finita, asimismo se determinó una interacción significativa de la cantidad de calicata en la verificación de componentes mineros cerrados. Por tanto, la metodología propuesta permitió establecer representatividad espacial y cantidad de puntos a un nivel de confianza del 95 % aplicado en 13 componentes mineros para verificar estabildades geoquímicas de componentes mineros en cierre, coadyuvando además en proteger la infraestructura de cierre, asimismo disminuyendo costos y equipamiento en las supervisiones ambientales.

Abstract

At present, Peru does not have a standardized methodology to determine the optimal number of sampling points, specifically test pits, required to verify compliance with enforceable geochemical stability obligations in critical components during the mine closure stage, such as tailings deposits, waste rock dumps, open pits, leach pads, among others. This study proposes a methodology to determine spatial representativeness and the optimal number of sampling points for finite populations and spatial variability analysis, applied to 23 closed mining components with areas ranging from 0.038 ha (384.38 m²) to 66 ha. The statistical feasibility of a baseline grid consisting of one (1) test pit per 5,000 m² (0.5 ha), considered an expert-judgment criterion, was evaluated and adjusted through a 2² factorial design with two center points and an experimental design at a 95% confidence level. In the assessment of the geostatistical formula (N), it was determined that a density of 1 test pit per 5,000 m² (0.5 ha) is suitable for applying the finite population sample size formula. Likewise, a significant interaction was identified between the number of test pits and the verification of closed mining components. Therefore, the proposed methodology made it possible to establish spatial representativeness and the number of sampling points at a 95% confidence level, applied to 13 mining components to