

El relave minero de Collpa, como aditivo estabilizante de suelos limo inorgánico (ML) para la construcción de edificaciones

Collpa mining tailings, as a stabilizer additive for LM soils for the construction of buildings

Hans Alexander Llacza Cardenas¹

Recibido: 25/03/2023 - Aprobado: 26/05/2023 – Publicado: 06/10/2023

RESUMEN

El depósito de relave minero abandonado, ubicado en la localidad de Collpa del distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, provincia de Yauli, departamento de Junín, genera una contaminación ambiental grave a este poblado; sobre todo afecta a la cuenca alta del río Mantaro; esta es la razón por la cual se estudió este material para su posible uso como aditivo estabilizante de un tipo de suelo: ML (limo inorgánico), para la cimentación de construcciones. Los procedimientos fueron ensayos de laboratorio como ensayos granulométricos, límites de Atterberg, proctor estándar, de gravedad específica de los suelos, de corte directo y para finalizar se analizó la carga portante admisible de cada muestra analizada (q_{adm}). Estas muestras están constituidas por el suelo ML con la combinación del relave minero en proporciones porcentuales de 0%, 20%, 30% y 50%, con respecto al peso total de cada muestra. Los resultados del proyecto, al analizar y calcular los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio, fueron: 5kg/cm², 4.67kg/cm², 5.84kg/cm² y 7.57kg/cm², que son los q_{adm} de cada muestra con la proporción de relave en forma ascendente, respectivamente. En conclusión, el relave minero estudiado aumenta las características mecánicas del suelo ML, estabilizándolo con respecto a su estado base.

Palabras claves: Suelo LM, relave, aditivo, ensayos de laboratorio, carga portante admisible.

ABSTRACT

The abandoned mining tailings deposit, located in the town of Collpa in the district of Santa Bárbara de Carhuacayán, province of Yauli, department of Junín, generates serious environmental contamination to the town of the district, above all, it affects the upper basin of the Mantaro river; For this reason, this material was studied for its possible use as a stabilizing additive for a type of soil: ML (Inorganic Silt), for the foundation of constructions. The procedures were laboratory tests that are: Granulometric tests, Atterberg Limits, Standard Proctor Test, Soil Specific Gravity Test, Direct Shear Test and finally, the admissible bearing load of each analyzed sample (q_{adm}) was analyzed; these samples are constituted by the ML soil with the combination of the mining tailings in percentage proportions of 0%, 20%, 30%, 50% with respect to the total weight of each sample. The results of the project, when analyzing and calculating the data obtained from the laboratory tests, were: 5kg/cm², 4.67kg/cm², 5.84kg/cm² and 7.57kg/cm², which are the q_{adm} of each sample with the proportion of tailings. in ascending order respectively. In conclusion, the studied mining tailings increases the mechanical characteristics of the ML soil, stabilizing it with respect to its base state.

Keywords: LM soil, Tailings, Additive, Laboratory tests, Permissible bearing load.

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado, Unidad de Posgrado.Lima,Perú. Egresado de la Maestría en Geología con Mención en Geotécnica.

E-mail: hans.llaczac@ciplima.org.pe - ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1951-1576>

I. INTRODUCCIÓN

El relave minero es uno de los problemas principales en el Perú que ha generado controversia por su poder destructivo al medio ambiente. Este tipo de material está constituido por diversos minerales que poseen las rocas, las mismas que son sometidas a una serie de procesos de desintegración con agua, para la extracción de la materia prima deseada. Al estar dichos componentes en interacción se generan reacciones químicas entre el agua y los metales pesados (Pb – plomo) provocando la contaminación en el entorno superficial y subsuperficial. En su fase inicial el relave minero se presenta de forma lodosa, que es transportado a diversos depósitos, que al mantener contacto con el suelo y el flujo del agua que está presente en su nivel freático, puede intercambiar elementos químicos, que son absorbidos por las plantas y los animales del poblado, generando de esta manera una contaminación considerable al ecosistema y a las personas (Cano, M., et al., 1997).

Los depósitos de relave que más generan contaminación ambiental son de las unidades mineras antiguas, porque se realizaron en épocas que el país carecía de normas y leyes que regularan el impacto que generaron al medio ambiente; por esta misma razón muchas empresas mineras evadieron sus responsabilidades ambientales y abandonaron gran cantidad de pasivos ambientales mineros. Actualmente, los depósitos de relave antiguos siguen generando contaminación, debido al escaso interés, conocimiento y manejo de nuevas tecnologías de los entes gubernamentales, para convertir el relave de estas unidades mineras en un material reutilizable y útil para las diferentes industrias: construcción (Romero, A., et al., 2008).

Un informe emitido en el año 2005 por el Banco Mundial aborda la contaminación ambiental en el Perú a causa de la actividad minera antes de 1990, que fue el año en el que el Estado peruano presentó las primeras leyes ambientales. Este informe muestra una jerarquización de las ciudades que poseen gran cantidad de depósitos de relave minero y que genera contaminación ambiental constante; entre ellas el distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán de la provincia de Yauli del departamento de Junín, se encuentra en el puesto N° 4 (Diario Correo, 2012). Se estima que

existen, en dicho distrito, aproximadamente 20 pasivos ambientales abandonados, cada uno contiene centenas de miles de toneladas de relave minero, generando un problema grave de contaminación ambiental constante por las reacciones químicas con el agua del suelo y subsuelo; uno de ellos (Figura 1) se encuentra próximo a la cuenca alta del río Mantaro (Llacza, H., 2021).

El objetivo principal del artículo de investigación fue evaluar la utilidad y eficacia del relave minero, como un potencial aditivo estabilizante, que está presente en el depósito abandonado cerca de la cuenca alta del río Mantaro en Collpa, distrito de Carhuacayán, para la estabilización de un tipo de suelo: ML, que tiene características mecánicas inestables para la construcción de edificaciones unifamiliares y multifamiliares; sin embargo, está presente en diversos departamentos del país. El suelo ML se caracteriza por el tamaño de sus partículas, en su mayoría, presentan dimensiones que comprenden de 0.0075 mm – 0.002 mm, por ello se clasifican como suelos finos (Braja D., 2015). Estos suelos, habitualmente se presentan en áreas de terrenos que fueron utilizados en la agricultura, gracias al crecimiento poblacional y económico, fueron proyectados como zonas urbanas (Cabrera, T., et al., 2011). Cabe resaltar que, para usar relave como aditivo estabilizante, se debe tomar en consideración aspectos como la profundidad de la cimentación, que no debe toparse ni estar cerca del nivel freático del suelo. Se debe evitar el contacto con el flujo del agua y la caracterización del suelo, antes de llegar a la profundidad de la cimentación, debe tener uno o más estratos con suelos altamente impermeables, esto es importante para impedir el paso del agua producto de las precipitaciones temporales de la zona en donde está ubicada la obra de construcción.

Con el uso masivo del relave minero de Collpa como estabilizador de suelo, se podría reducir la masa y volumen de los pasivos mineros abandonados, que se estiman en millones de kg y m³, respectivamente. Se puede llegar hasta a una posible limpieza de las áreas afectadas, que generaría un impacto ambiental positivo importante y conveniente para la agricultura, ganadería y las personas de los pueblos que se encuentran ubicados cerca de estos depósitos de relave.

Figura 1

Depósito de relave abandonado, unidad minera Carhuacayán



Figura 2
Cantidad promedio de zinc y plomo en ppm del relave de Collpa

Unidad Minera Carhuacayan				
Metal	Compósito	Compósito	Compósito	Promedio
Pesado	1 ppm	2 ppm	3 ppm	ppm
Zinc (Zn)	9088.2	5375.8	11967.1	8810.4
Plomo (Pb)	3420.8	3789.3	4323.0	3844.4

1 ppm = 1 mg / kg

Fuente: Llacza, H., & Castellanos, P., 2020.

II. METODOLOGÍA

2.1 Ubicación y muestreo

Para elaborar la investigación se comenzó por identificar la ubicación de la extracción de la muestra de suelo ML, que fue dentro de la zona de la Alameda Santa Rosa en el distrito de San Martín de Porres del departamento de Lima. Allí se realizó una calicata de 2.00 m de profundidad, las cantidades de suelo extraído fueron acorde a las necesidades de cada ensayo de laboratorio previamente definidos. La ubicación del relave minero abandonado, para la extracción de las muestras, fue en Collpa, distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, cuya coordenadas UTM son 8762080.71 (N) y 356638.44 (E), zona 18S; este relave fue producto de la extracción de vetas de sulfuros Pb (plomo), Zn (zinc), Cu (cobre) y Ag (plata) (CONGEO, 2018). El relave está compuesto mayormente de metales pesados como el Pb, con un promedio de 8810.4 ppm y Zn, con un promedio de 3844.4 ppm, que se presentan en la Tabla 2. Para extraer las muestras de relave se utilizó Equipo de Protección Personal (EPP) hermético para la protección de los compuestos tóxicos que puede poseer el relave, ya que en su estado natural está expuesto por precipitaciones del lugar. Es importante que el relave minero extraído esté seco; por ello, antes de empaquetarlo para su transporte, la muestra extraída, en el mismo lugar del depósito, se secó gracias a los rayos solares que evaporaron la humedad del relave.

Una vez obtenidas las muestras se definió el diseño experimental a criterio del autor, para lo cual se utilizó la nomenclatura: S (suelo) y RLV (relave). Las muestras que se ensayaron son 4: 100%S-0%RLV, 80%S-20%RLV, 70%S-30%RLV, 50%S-50%RLV. Los ensayos se realizaron en un laboratorio de mecánica de suelos certificado.

2.2 Ensayos para la clasificación de suelos: granulometría y límites de Atterberg

Para evaluar el tipo de suelo extraído y reconocer su clasificación se utilizó la norma ASTM D-422 63 (2007); según esta norma, el suelo debe permanecer 24h en un horno con temperatura constante de 110 °C, luego ser pesado y lavado para extraer las partículas finas con ayuda de la malla granulométrica N°200; seguidamente se llevó al horno para extraer toda la humedad y volverlo a pesar;

se utilizó 0.500 kg de muestra de suelo y quedó 103.13 g después del lavado y secado. Este resultado nos indica que más del 50% de las partículas pasan la malla N°200, por lo tanto, se concluye que la muestra pertenece a un suelo fino, por esta razón realizamos los ensayos de límites de Atterberg.

Para la clasificación de los suelos finos según la norma ASTM D-4318 00 (2005), se requiere la determinación de límites de Atterberg: Límite líquido (LL), Límite plástico (LP), Índice de plasticidad (IP) y finalmente la clasificación por el Sistema Unificado de Suelos (SUCS). Los ensayos realizados nos dieron los resultados de la Tabla 1, para esta clasificación se necesitó 0.300 kg de suelo que pasa por la malla N°40.

2.3 Ensayo de compactación de suelo: Proctor estándar

SEl desarrollo de la presente norma ASTM D-698 (2012), define para las muestras de suelo, la densidad seca máxima (γ_d) junto a la cantidad de humedad óptima (w). Para obtener estos datos por 4 muestras (suelo + relave), se extrajo 70.0 kg aproximadamente de suelo ML alterado y aproximadamente 50 kg de relave. También se utilizaron herramientas de laboratorio normalizadas: molde Proctor con 944 de volumen aproximadamente; pisón con un peso de martillo de 24.4N a una caída de 304.8 mm; horno laboratorio, etc. Los resultados de las diferentes muestras de suelo combinados porcentualmente con el relave se muestran en la Tabla 2.

2.4 Ensayo de gravedad específica de los suelos

Para proceder al ensayo de las 4 muestras definidas anteriormente, según la norma, ASTM C-127 04 (2017), para hallar la gravedad específica de los suelos (Gs) se necesitaron muestras, que el tamaño de sus partículas pueda pasar por el tamiz N°4; se requirió de la extracción de suelo ML aproximadamente 0.500 kg y de relave 0.200 kg. Con ayuda de las herramientas e instrumentos normalizados y requeridos para el presente ensayo se obtuvieron los resultados de cada muestra ensayada (Tabla 2), estos datos son requeridos para poder calcular la carga portante del suelo, mediante el uso de la ecuación general de cargas aplicadas

2.5 Ensayo de corte directo

En este ensayo se obtuvieron datos de la cohesión (C') y ángulo de fricción (Ø) del suelo; estos datos se obtuvieron de muestras alteradas, 1 kg por cada muestra; para el ensayo se consideró el 94% de la densidad que se obtuvo del ensayo del Proctor estándar. Según la norma ASTM D-3080 04 (2012), para la recolección de estos datos se utilizaron las siguientes herramientas principales: dispositivo de carga, dispositivo de fuerza de corte y fuerza normal, balanza, indicadores de deformación y cronómetro. Los resultados que se obtuvieron se presentan en la Tabla 2:

2.6 Cálculo de la capacidad de carga del suelo

La capacidad de carga del suelo es la fuerza máxima por metro cuadrado antes que se produzca una falla de corte (Braja D., 2015). Para calcular la carga última portante del suelo se necesitaron los resultados de los ensayos de laboratorio anteriores, para poder utilizar la fórmula planteada por Meyerhof (1963) que se plantea de la siguiente manera:

$$q_u = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

Donde:

- q_u = Carga portante última
- q = Esfuerzo efectivo en el fondo de la cimentación
- B = Longitud del lado zapata cuadrada
- $N_c N_q N_\gamma$ = Factores de carga
- $F_{cs} F_{qs} F_{\gamma s}$ = Factores de forma
- $F_{cd} F_{qd} F_{\gamma d}$ = Factores de profundidad
- $F_{ci} F_{qi} F_{\gamma i}$ = Factores de inclinación

Además de los datos obtenidos por los ensayos de laboratorio, en la Ecuación (1), es necesario contar con características de la cimentación que se desea diseñar,

por ello se consideró medidas de una cimentación convencional, que es recurrente en la zona urbana donde fue extraído el suelo ML. Las medidas convencionales de cimentación que se consideraron, según el Plan de Rehabilitación del distrito de San Martín de Porres (2018), son el ancho y el fondo de cimentación que se muestran en la Figura 3.

Para hallar la capacidad de carga aplicada del suelo, la norma E.050 del RNE (2018), especifica que la carga admitida tiene un factor de seguridad, con un valor de 3 y debe ser dividido entre el valor que resulta de la carga portante última (q_u), el resultado de dicha división es la carga portante admisible (q_{adm}); esta carga es considerada importante para poder evaluar la estabilidad del suelo antes de construir una edificación.

III. RESULTADOS

Evaluando los datos de los ensayos de laboratorio, para calcular la estabilidad del suelo, se obtuvo las cantidades portantes admisibles (q_{adm}) de cada muestra analizada, que se observa en la Tabla 3. Con estos datos se realizó una gráfica (Figura 4) para la mejor observación de la variación porcentual de las cargas portantes con respecto a la variación de la muestra de suelo ML con el relave. cambio medioambiental que perciben lo atribuyen a la contaminación minera, lo cual probablemente es cierto.

Observando la variación porcentual de las q_{adm} , se puede deducir que la estabilización del suelo, utilizando más porcentaje de relave, tiende a aumentar sus propiedades portantes, esto es debido a que, en el resultado del ensayo del Proctor estándar, las densidades máximas secas tienden a aumentar ascendentemente, mientras se eleva la cantidad de relave que se añade a cada muestra, la variación porcentual máxima, de estas densidades, es de 108.8% y se obtuvo de la muestra 50%S-50%RLV.

Tabla 2:
Resultados de los ensayos de muestras de suelo LM con el relave minero.

Muestra	Compactación de suelo (ASTM D-698)		Gravedad específica (ASTM C-127)	Corte directo (ASTM D-3080)	
	γ_d (max) (gr/cm ³)	w (%)	Gs	Ø (°)	C' (kg/m ²)
100%S-0%RLV	1.407	27.95	2.62	22.74	0.190
80%S-20%RLV	1.495	23.42	2.68	24.49	0.064
70%S-30%RLV	1.528	22.42	2.70	26.72	0.053
50%S-50%RLV	1.531	19.98	2.74	29.03	0.044

Figura 3
Diseño de cimentación convencional

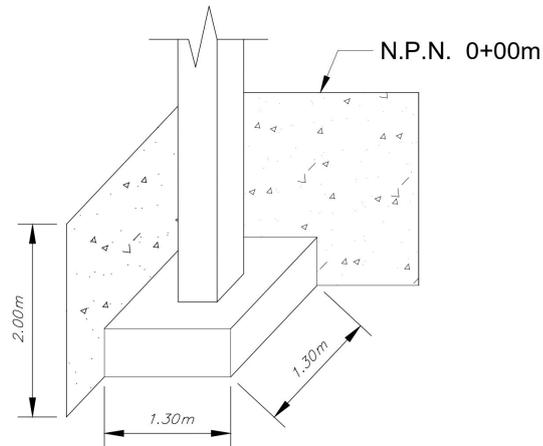
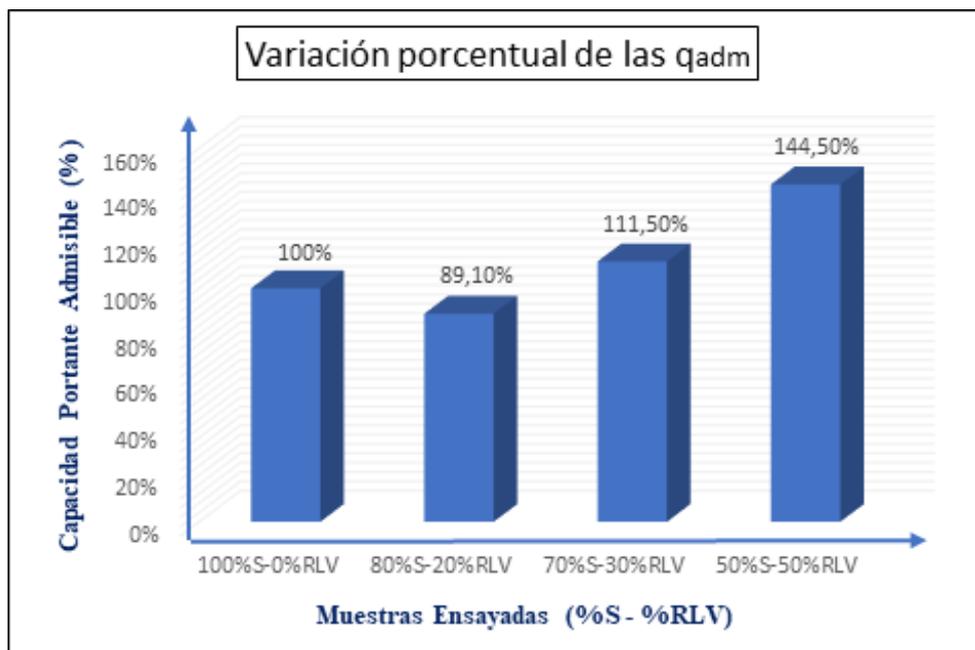


Tabla 3
Resultados de cargas portantes admisibles

Muestra	qadm (kg/cm ²)
100%S-0%RLV	5.25
80%S-20%RLV	4.67
70%S-30%RLV	5.84
50%S-50%RLV	7.57

Figura 4
Variación porcentual del suelo LM adicionando el relave minero



IV. DISCUSIÓN

La interpretación de los resultados del presente proyecto de investigación fue que el relave minero de Collpa de Santa Bárbara de Carhuacayan, sí puede ser utilizado como un aditivo estabilizante de suelos ML, debido a que se evidencia un aumento, con respecto a su estado base del suelo en mención, en un 44.50%. Esto significa que, al ser usado como aditivo, las secciones de las zapatas de cimentación pueden ser menores, generando un ahorro económico a la obra de construcción, ya que no se requeriría el mismo volumen de concreto para realizar una zapata segura que evite asentamientos producto de la falla del suelo.

El estudio de Chipana E., 2018, presenta la reutilización del relave para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo de la carretera Ananea – Suches en el departamento de Puno – Perú, mediante su adición al suelo que conforma el afirmado de la carretera; este suelo es clasificado mediante el SUCS como suelo SC: arenas mal graduadas, con presencia de arcillas. La combinación del 70% del suelo SC con el 30% del relave, presentó resultados favorables como: 2.116 gr/cm³ de densidad seca máxima, obtenido del ensayo Proctor modificado y el 62% de resistencia al desgaste del ensayo CBR, con ello se concluye que el uso del relave sí es posible para otros tipos de suelos y para diversos usos en la construcción como es el caso de mejoramiento de carreteras.

Por otra parte, según Torres Y. (2019) en su investigación sobre el uso de los materiales del depósito de relaves de la producción de cobre y otros minerales de la empresa minero metalúrgica Doe Run, para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del material subrasante que se clasifica como suelo ML, demuestra una estabilización progresiva respecto al aumento porcentual del aditivo al suelo ML. Las muestras de suelo combinadas con el aditivo se definieron de la siguiente manera: 90% Suelo + 10% Escoria, 80% Suelo + 20% Escoria, 70% Suelo + 30% Escoria y 60% Suelo + 40% Escoria, obteniendo resultados como las densidades máximas secas: 1.826 gr/cm³, 1.931 gr/cm³, 2.043 gr/cm³ y 2.147 gr/cm³, respectivamente obtenidas del ensayo del Proctor modificado, y los resultados del ensayo de CBR para el 95% de la densidad seca máxima fueron: 7.70%, 11.40%, 14.30%, 17.10%, generando un incremento de más del 50% para la muestra 60% Suelo + 40% Escoria con respecto a su estado inicial. De esta investigación se concluye que, sí se puede realizar estabilizaciones en un suelo ML mediante el uso de materiales de depósitos de relave, como en el mejoramiento de pavimentos. Sin embargo, en esta investigación, el aditivo estudiado pertenece a un pasivo ambiental minero de una empresa privada y se pueden tener restricciones e impedimentos para el uso de sus pasivos. Por otro lado, los depósitos de relaves de Collpa no pertenecen a ningún ente privado, por eso están abandonados y generan contaminación ambiental constante, porque no existen planes de mantenimientos de depósitos.

Otra evidencia de investigaciones científicas sobre la reutilización del relave, señala la utilización del relave como

agregado para la fabricación de ladrillos (Romero, A., & Flores, S. 2010), esta investigación logra demostrar que el relave sí puede ser reutilizado, sin embargo, para que esto sea posible, primero se debe descontaminar químicamente, encapsulando las partículas tóxicas, los metales pesados, con ayuda del tratamiento con cemento portland Tipo I al tipo V. Esta descontaminación no es necesaria para la estabilización de suelos con fines de cimentación de edificaciones, ya que para utilizar el relave en los suelos ML, la condición es que no exista un nivel freático en el subsuelo, donde se va a cimentar la edificación; es decir, que el relave no tope el agua del subsuelo, ya que ésta presentaría un flujo que lo haría transportar fuera del área de construcción.

V. CONCLUSIONES

- La adición del relave minero de Collpa, sí estabiliza, las propiedades mecánicas del suelo ML para proyectos de edificaciones urbanas. Esta estabilización se demuestra para dosificaciones de hasta 50% de relave añadido al suelo.
- En el ensayo de Proctor estándar se obtuvo resultados favorables, ya que aumenta la densidad mientras más porcentaje de relave se añade al suelo ML; este aumento se demuestra hasta la dosificación: 50%S + 50%RLV, el cual se obtuvo con un aumento del 108.8% de la densidad con respecto a su estado base, con ello reduce su compresibilidad, lo que aumenta la capacidad de soporte del suelo.
- En el ensayo de la gravedad específica, hubo un aumento máximo en la muestra 50%S + 50%RLV, con respecto a las otras muestras; esto representa el incremento de la resistencia a la deformación y la carga; también se reduce la expansión y contracción del suelo.
- Se demuestra que el relave contribuye a que el suelo ML mejore su resistencia al deslizamiento y a la rotación cuando se administra hasta una dosificación del 50% con respecto al peso del suelo ML, esto debido a que en los resultados del ensayo de corte directo se demuestra un aumento en el ángulo de fricción (ϕ) en la dosificación del 50%S + 50% RLV con respecto a su estado base.

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradezco cordialmente a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, sobre todo a los docentes de la maestría en Geología con mención en Geotecnia, por la educación avanzada, que me ayudó a profundizar los conocimientos de esta hermosa rama de la ingeniería. También, agradezco a la empresa E y P de ingeniería S. R. L. por la atención y asesoramiento de sus servicios que permitieron la culminación del presente artículo de investigación.

V. REFERENCIAS

- ASTM D4318 00. (2005). Método de ensayo estándar para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. USA: ASTM.
- ASTM D422 63. (2007). Método de ensayo estándar para el análisis granulométrico. USA: ASTM.
- ASTM D698. (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). USA: ASTM.
- ASTM D3080 04 (2012). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. USA: ASTM.
- ASTM C127 04 (2017). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. USA: ASTM.
- Cabrera, T., García, R., Miyashiro, J., & Pizarro, F. (2011). La ciudad neoliberal. Nuevas urbanizaciones en Lima Sur. *Perú Hoy*. Ajustes al modelo económico. La promesa de la inclusión, 257-282.
- Cano, M., Moreno A., & González, J. (1997). Evaluación de la contaminación por metales pesados para suelos de cultivo. *Ecología*. 11: 83 - 89.
- Chipana, E. (2018). "Empleo del relave minero para el mejoramiento de las características mecánicas de la carretera Ananea-Suches". [Tesis de grado]. Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez. Juliaca, Perú. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/1674>
- CONGEO. (2018). Carhuacayán. Recuperado de: <https://congeo.es/service/carhuacayan/>
- Das, B. M. (2012). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. (7ma ed.) México, D.F.: Cengage learning.
- Das, B. M. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica. (4ta ed.) México, D.F.: Cengage learning.
- Diario Correo, R. (2012, enero 21). Carhuacayán en La Oroya en 4to. Lugar de pueblos contaminados. Correo. <https://diariocorreo.pe/peru/carhuacayan-en-la-oroya-en-4to-lugar-de-pueblos-contaminados-502623>
- Llacza, H., & Castellanos, P. (2020). Hongos filamentosos de relave minero contaminados con plomo y zinc. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM*, 23(45), 37-42. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v23i45.18046>
- Llacza, H. (2021). Evaluación de la biosorción de Pb en hongos filamentosos del distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, Yauli-Junín. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/17418>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). Norma técnica E.050 de Suelos y Cimentaciones.
- Municipalidad de San Martín de Porres (2018). Plan de rehabilitación ante emergencias y desastres 2018 - 2021, <https://www.regionsanmartin.gob.pe/OriArc.pdf?id=107458>
- Romero, A., Medina, R., & Flores, S. (2008). Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM*, 11(22), 13-16.
- Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, 13(2), 075-082. <https://doi.org/10.15381/idata.v13i2.6193>
- Torres, Y. (2019). Estabilización de suelos cohesivos utilizando escoria de cobre para su uso como subrasante mejorada. [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3252816>

Conflicto de interés

El autor declara no tener conflictos de intereses.