

Diseño de un depósito de relave reubicado frente a un relave contaminado en Ticapampa – Recuay - Ancash

Design of a tailings pond relocated in front of a tailings contaminated in Ticapampa – Recuay – Ancash

Jorge Escalante Contreras¹

Recibido: 19/07/2023 - Aprobado: 29/09/2023 – Publicado: 15/12/2023

RESUMEN

El depósito de relave Ticapampa limita con la margen izquierda del río Santa, los resultados de las investigaciones geológicas, geomorfológicas, geodinámicas y topográficas muestran un volumen de 1'043,000.53 m³ de relave, con elevado contenido de ácidos, sulfatos, metales disueltos de mina, así como de cobre y de gran cantidad de sólidos en suspensión. Por las precipitaciones pluviales los relaves son vulnerables a la erosión, infiltración y contaminación de la parte inferior.

Para mitigar la contaminación se diseñó un nuevo depósito impermeable de relave con una geomembrana HDPE 1.5 mm de espesor, la misma que será instalada por encima de geotextil con 400 gr/m² no tejido, donde se encapsuló el relave para monitorear la infiltración y el movimiento con pendiente negativo que produce aguas ácidas y contamina la parte inferior. La geomembrana está constituido por polietileno con una densidad alta (PEAD), sus resinas son altas en peso molecular; así se forman las geomembranas flexibles, que son considerados de buena calidad; fue formulada para resistir a los principales agentes químicos como los rayos ultravioletas degradables.

Palabras claves: Contaminación, depósito, diseño, flujo, impermeable, relave.

ABSTRACT

The Ticapampa tailings deposit borders the left bank of the Santa River. The results of the geological, geomorphological, geodynamic and topographic investigations show a volume of 1,043,000.53 m³ of tailings, with a high content of acids, sulfates, dissolved mine metals, as well as copper and a large amount of suspended solids. Due to rainfall, the tailings are vulnerable to erosion, infiltration and contamination of the lower part.

To mitigate contamination, a new impermeable tailings deposit was designed with a 1.5 mm thick HDPE geomembrane, which will be installed above geotextile with 400 gr/m² nonwoven, where the tailings were encapsulated to monitor infiltration and movement. with a negative slope that produces acidic waters and contaminates the lower part. The geomembrane is made of high-density polyethylene (HDPE), its resins are high in molecular weight; This is how flexible geomembranes are formed, which are considered of good quality; It was formulated to resist the main chemical agents such as degradable ultraviolet rays.

Keywords: Contamination, deposit, design, flow, impermeable, tailings.

1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú

E-mail: jescalantec@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3390-6998>

I. INTRODUCCIÓN

El departamento de Ancash se ubica en una zona minera, razón por la cual encontramos el relave pasivo de Ticapampa, que por su formación geológica, geomorfológica y geodinámica viene contaminando y generando impacto ambiental negativo, afectando la salubridad de los pobladores.

El depósito de relave pasivo Ticapampa se encuentra ubicado geográficamente en la coordenada UTM: 8'922,454.92 Norte y 231,013.92 Este, a una altura de 3,520.00 msnm.

El Estado peruano a través del Ministerio de Energía y Minas creó leyes como la N.º 28271 y N.º 28526, y el DS N.º 59-2005-EM, con el objetivo fundamental de regular los denominados pasivos ambientales de la actividad minera (PAM).

La precipitación pluvial se genera en la parte alta de la cordillera blanca, por ende, el nivel del cauce máximo del agua del río santa, se encuentra ubicado a una elevación muy próximo al relave. Se evidencia que desde la parte alta el agua producto de la lluvia transporta gran cantidad de material morrénico, razón por la cual es necesario descontaminar los sulfuros.

Para el levantamiento topográfico se instalaron 08 puntos de control topográfico a partir de dos puntos geodésicos de orden "C" pertenecientes al IGN, para

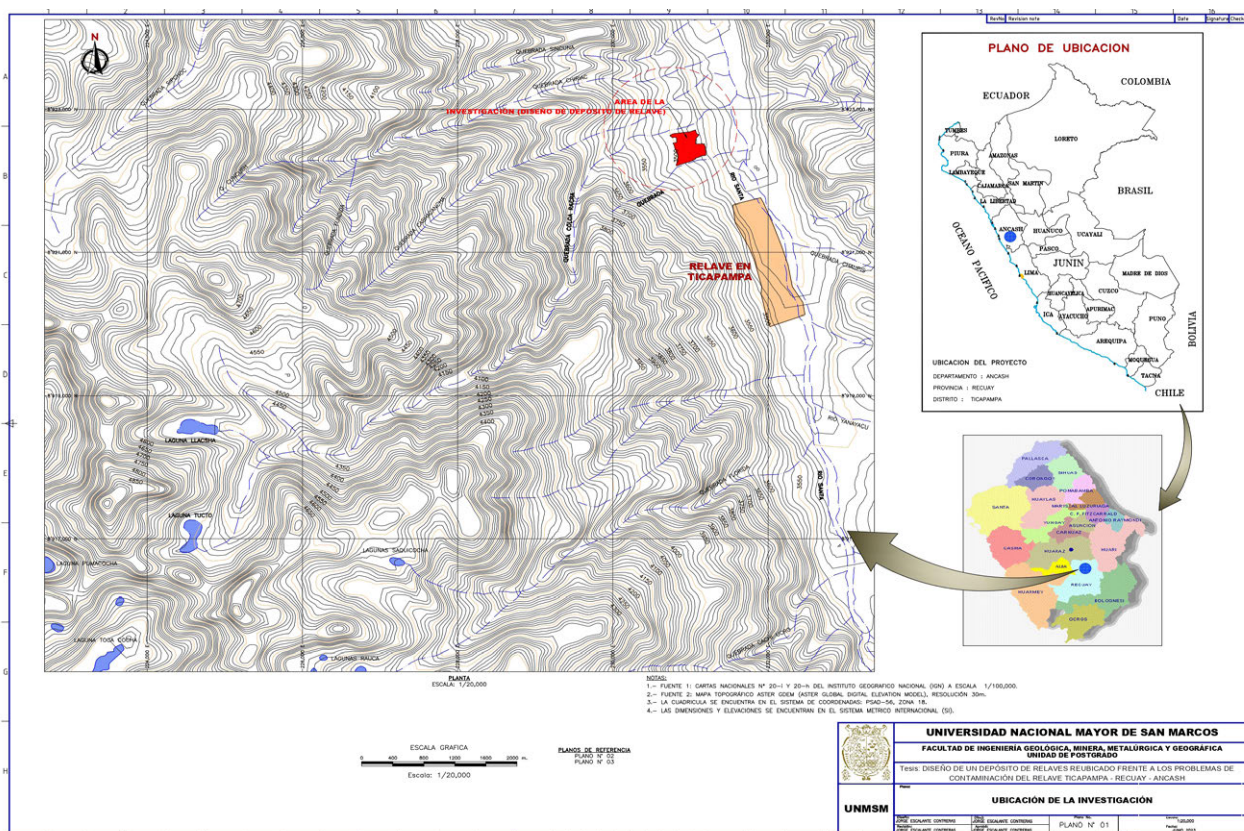
georeferenciar los trabajos de topografía (replanteo y levantamientos de detalle). Ver Figura 1.

Referente al peligro sísmico, el área del depósito de residuos inertes Ticapampa, cuenta con intensidad de VII grados, medidas según la escala de Mercalli modificada. De acuerdo a la información espacial de los movimientos sísmicos del tipo instrumental, la zona de investigación es vulnerable por los sismos que se originan por la convergencia de las placas tectónicas. Para el diseño de la investigación del depósito de residuos inertes se ha empleado un valor más conservador igual a 2/3 del valor de la aceleración máxima esperada (0.26g) igual a 0.17g para 500 años de período de retorno.

Para mantener un desarrollo sostenible, en toda actividad minera responsable, se debe minimizar los impactos ambientales negativos, respetando los procedimientos técnicos de manera eficiente y manejando adecuadamente la parte económica.

Durante la vida útil de un determinado proyecto minero metalúrgico, es de suma importancia el aspecto técnico para lograr un adecuado desarrollo, que nos permita manejar y mitigar los impactos. El Perú tiene una serie de disposiciones que garantizan el manejo adecuado que determinan las investigaciones de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), el Programa de Adecuación de Manejo Ambiental (PAMA), los Límites Máximos Permisibles (LMP) y finalmente es muy relevante también los Estándar de Calidad Ambiental (ECA).

Figura 1
Ubicación del Proyecto de Investigación.



El depósito de relave Ticapampa contamina la parte inferior de la zona con los materiales sulfurosos que producen ácidos por infiltración y son erosionadas por las precipitaciones pluviales, ver la Figura 2.

Camino (2021), en la tesis de maestría: Estudio experimental del transporte de relave en un lecho de grava en el marco de la evaluación de la contaminación de ríos por accidentes mineros, experimentos con un tomógrafo, dice transporte de distintas concentraciones de relave minero sobre un lecho de grava, con el fin de aportar a los estudios asociados al transporte de sedimentos de ríos por efectos de descarga relaves producto de accidentes mineros, fue cumplido. Así como los objetivos específicos relativos a la generación de una metodología para determinar el gasto sólido de fondo y suspensión, y la cuantificación del relave que queda en el lecho. A través de uso de un tomógrafo resistivo.

Ramírez (2020), en la tesis de maestría: Metodología para la evaluación de la susceptibilidad de erosión y potenciales inestabilidades físicas en depósitos de relaves, dice que su investigación determina el proceso de susceptibilidad referente a la erosión y a la potencia de inestabilidad físicas en los denominados relaves inertes.

Chira (2021), en su tesis de doctorado: Impacto de los metales pesados del río Mantaro en la aptitud de los suelos agrícolas del sector Jauja-Huancayo, Junín, 2020, afirma que todo material del tipo metal pesado existente sobre el lecho del río Mantaro generará un impacto negativo en la conservación de los suelos destinados a la agricultura de la zona del sector de Jauja.

Romero et al., (2008). Determinación mineralógica de metales pesados en el relave de Ticapampa, afirma que se determinó la composición mineralógica por difracción de rayos X (DRX), evidenciándose que el relave tiene una cantidad considerable de sulfuros metálicos como pirita y galena, que son los sulfuros primordiales en la obtención de las aguas ácidas. Ver Tabla 1.

Como resultado de la caracterización mineralógicos, textura y química, obtenidos a partir de muestras de suelos y relaves por difracción de rayos X, se obtuvo que el relave está íntimamente asociado al cuarzo, con alto contenido por encima del 80% y previo análisis exhaustivo geoquímico del relave, podemos concluir que la mineralogía es polimetálica de Cu-Pb-Zn, relacionado con Au-Ag, que se formó a baja temperatura dentro de un yacimiento volcánico del tipo epitermal.

Figura 2

Drenaje de ácidos producto del material sulfuroso hacia el río Santa



Tabla 1

Mineralogía del relave Ticapampa

Mineral	Fórmula	%
Cuarzo	SiO ₂	80.82
Muscovita	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	5.15
Jarosita	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	4.11
Yeso	CaSO ₄ .2H ₂ O	3.45
Diáspora	AlOOH	2.79
Paligorskita	(Mg,Al) ₅ (Si,Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₂ .8H ₂ O	1.75
Clorita	(Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	1.21
Anhidrita	CaSO ₄	0.71

Nota: Datos tomados de Romero et al., (2008).

II. MÉTODOS

Hernández, S., Fernández, C., y Baptista, L. (2010), en su libro Metodología de la investigación, afirman que, el tipo de investigación es aplicado porque se aplicará en la investigación. Los ensayos que se realizaron son estándares y especiales, con un diseño de un solo grupo, por ende, el diseño de investigación es preexperimental. Los autores que profundizaron sus investigaciones en el área mencionan que se pueden emplear ensayos de otros experimentos inéditos de mayor confiabilidad. Se realizó evaluación del grupo de control antes y después (pretest – posttest), se tuvo en cuenta la siguiente estructura.

$$a. [A] \begin{array}{ccc} Y_b & X & Y_a \\ Y_b & -X & Y_a \end{array} \begin{array}{l} \text{(Experimental)} \\ \text{(Control)} \end{array}$$

$$b. [Ap] \begin{array}{ccc} Y_b & X & Y_a \\ Y_b & -X & Y_a \end{array} \begin{array}{l} \text{(Experimental)} \\ \text{(Control)} \end{array}$$

Para el caso (a) pretest.- Tenemos en el grupo expPara el caso (a) pretest: tenemos el grupo experimental, cuyas muestras se llevaron al laboratorio y el grupo de control que fue in situ.

Donde:

Yb: Disminución de contaminación del relave de Ticapampa (el material que existe actualmente en la zona se transportará a un nuevo lugar de depósito de relave reubicado).

Ya: Disminución de contaminación del relave de Ticapampa (el área actual quedará sin material contaminante).

X: Diseño de un depósito de relave reubicado (se realizó clasificación de suelo por SUCS y AASHTO).

Para el caso (b) posttest: tenemos el grupo experimental que se contrastó con los resultados del laboratorio y el grupo de control que no varió, sigue idéntico.

Donde:

Yb: Disminución de contaminación del relave de Ticapampa (el material existente en la zona actualmente se transportará a un nuevo lugar, depósito de relave reubicado).

Ya: Disminución de contaminación del relave de Ticapampa (el área actual quedará sin material contaminante).

X: Diseño de un depósito de relave reubicado (con los resultados de laboratorio, muestras de suelo para clasificación de suelo por SUCS y AASHTO, para un ángulo de fricción interna, se realizó el diseño de depósito, donde se nota la variación, por ende, se considera experimental).

Se identificó una característica interesante de este diseño, la naturaleza de las puntuaciones que se analizaron muestran la diferencia o cambio [Yd - Ya], donde se puede apreciar que la manipulación de la variable independiente es contundente, entonces la manipulación experimental es fuerte, por ende, no se hará la diferencia [Yd - Ya], en consecuencia, se considera como preexperimental. La unidad de análisis es el relave de Ticapampa, ubicada paralela al eje del río, precisamente a la margen izquierda del río Santa, en temporadas de lluvias drenan con pendiente negativo, produciéndose contaminación. Ver Figura 3.

Figura 3

Contaminación del río santa por infiltración de agua de lluvia.



El área del relave de Ticapampa es de 90,000.00 m², tiene una longitud de 750 metros lineales y un ancho de 120 metros lineales; como se puede observar tiene una extensión considerable y limita con la zona urbana del distrito de Ticapampa. En la selección de la muestra, la principal técnica de recolección de datos fue la observación al área del nuevo depósito, a donde se transportará el relave que se encuentra en Ticapampa; para determinar la consistencia del nuevo diseño del depósito de relaves, se realizaron ensayos para definir las características y resistencia del suelo. Los resultados se consiguieron a través de muestras de suelos obtenidos de calicatas a cielo abierto, las mismas muestras se llevaron al laboratorio para realizar varios ensayos de acuerdo a las normas vigentes del E050, como la clasificación de suelos por SUCS y AASHTO, y corte directo para determinar la capacidad portante del suelo.

III. RESULTADOS

3.1 Geodesia y Geotecnia

En el control geodésico en la primera etapa se establecieron dos puntos geodésicos pertenecientes al IGN, ver Tabla 2, donde se indican las coordenadas UTM WGS-84 y en la Tabla 3, se indican las coordenadas UTM PSAD-56.

En la segunda etapa se realizó el levantamiento topográfico de detalle, con curvas de nivel en cada metro. Se observa que el lugar se encuentra delimitado, el área es suficiente para poder almacenar todo el material inerte. El procedimiento del levantamiento topográfico consistió en tomar como base dos (02) puntos de control geodésico denominados TPP1 y TPP2; a partir de los cuales se establecieron 08 estaciones topográficas con base en el sistema de coordenadas PSAD-56, a partir de cada una de estas estaciones, así como de los puntos GPS de control geodésico, se realizó el levantamiento mediante el método

de radiación, tomando en consideración los detalles existentes en el terreno. Ver Tabla 4.

Braja, M. DAS (2013), en su libro Fundamentos de ingeniería geotécnica, afirma que, durante la planificación, diseño y construcción de cimientos, muros de contención y estructuras de retención de tierras, a los ingenieros les resulta útil conocer el origen del depósito de suelo sobre el que se va a construir la estructura propuesta, ya que cada depósito presenta características geo mecánicas únicas. La mayor parte de los suelos que cubren la superficie de la tierra están formados por la erosión de las rocas. Las propiedades físicas del suelo se establecen principalmente por los minerales que constituyen las partículas del suelo y, por lo tanto, la roca de la cual se derivó.

La geotecnia comprende las actividades siguientes: exploración geotécnica a través de calicatas, exploración geotécnica a través de ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), tomando muestras alteradas, realizando ensayos de campo y llevando las muestras al laboratorio para proceder a los ensayos de mecánica de suelos.

3.2 Diseño de talud y análisis de estabilidad

La presa de arranque y terraplén de residuos inertes, para la confiabilidad en la operatividad requiere de un buen análisis de estabilidad estático y pseudoestático, por ende, se desarrolló una sección ubicada en un lugar más crítico, denominado presa de arranque y un terraplén de residuos inertes compactados. Los resultados de ensayos geotécnicos los observamos en la Tabla 5.

Se analizó el terraplén de residuos inertes y la presa de arranque bajo el sometimiento a las condiciones sísmicas y estáticas. En pseudoestático se usaron la resistencia no drenada (esfuerzos totales); sin embargo, en estático se usaron resistencias drenadas (esfuerzos efectivos). Para la evaluación del factor de seguridad se empleó el método Bishop. Se indica en la Tabla 6.

Tabla 2

Estaciones Geodésicas de Orden "C" Coordenadas UTM WGS-84

Punto	Ubicación	Zona UTM	Sistema de coordenadas	Orden	Este	Norte	Cota (msnm)
TPP1	Plaza Virgen del Pilar	18 Sur	WGS-84	C	231,922.891212	8'920,340.996938	3462.9182
TPP2	Mirador Cristo Montebello	18 Sur	WGS-84	C	231,575.654556	8'920,177.230455	3556.1873

Tabla 3

Estaciones Geodésicas de Orden "C" Coordenadas UTM PSAD-56

Punto	Ubicación	Zona UTM	Sistema de coordenadas	Orden	Este	Norte	Cota (msnm)
TPP1	Plaza Virgen del Pilar	18 Sur	PSAD-56	C	232,148.2086	8'920,708.5126	3462.9182
TPP2	Mirador Cristo Montebello	18 Sur	PSAD-56	C	231,800.9723	8'920,544.7476	3556.1873

Tabla 4
Estaciones Topográficas Coordenadas UTM PSAD-56

Punto	Norte	Este	Elevación	Descripción
1	8'922,608.2965	231,044.4498	3523.0111	CC1
2	8'922,166.8425	231,059.3790	3520.1546	FF
3	8'922,306.4575	231,082.6511	3508.87 15	EE4
4	8'922,292.3325	231,087.0506	3507.6582	EE3
5	8'922,613.1635	231,098.5025	3519.6933	CC2
6	8'922,530.4415	230,820.0004	3533.1490	AAA1
7	8'922,603.8985	230,815.6936	3532.5495	BB
8	8'922,508.3945	231,161.4144	3513.5722	CC3

Tabla 5
Resultados de ensayos geotécnicos.

N°	Descripción	Peso esp.(t/m3)	Drenada		No Drenada	
			C' (t/m2)	Ø' (°)	Cu (t/m2)	Øu (°)
1	Residuos inertes (limo arenoso)	1.9	0	29	1.2	26.5
2	Dique de arranque	2.1	0	30	1.9	22.9
3 y 4	Cimentación (Grava limosa con arena)	2.1	0	35	1	27
5	Cimentación (Depósito aluvial)	2.0	0	31	0	31
6	Cimentación (Arcila limosa)	2.1	0	25	1	22
7	Cimentación (Roca fracturada)	2.3	10	38	10	38

Tabla 6
Resultados de los Análisis de Estabilidad.

Estructura	Tipo de análisis	FS ANÁLISIS ESTÁTICO	FS ANÁLISIS SEUDOESTÁTICO (a=0.17g)
Dique de arranque	Local	1.579	1.809
Terraplén 1 + dique de arranque	Local	1.542	1.590
Terraplén 1, 2 + dique de arranque	Local	1.580	1.426
Terraplén 1,2, 3 + dique de arranque	Local	1.595	1.300
Terraplén 1, 2, 3 + dique de arranque	Global	1.790	1.280

Por la American Society of civil Engineers y The Internacional Comition on Large Dams, tenemos como resultado mínimo del factor de seguridad para pseudoestáticas igual a la unidad. Se concluye que será estable nuestra presa de arranque, de igual forma el terraplén de residuos inertes también presenta estabilidad en las condiciones sísmicas y estáticas.

Para la presa de arranque se realizó un diseño sobre una estructura perimetral que circunda el depósito de residuos inertes de Ticapampa. Esta presa de arranque se ejecutará con materiales gravo limosos y gravo arcillosos, producto de la selección de la excavación de los vasos 1 y 2, conforme a los planos de diseño. La longitud del eje principal de la presa de arranque es de 1160.14 metros lineales y un ancho de 3.00 metros lineales de corona. La presa de arranque diseñada llega a obtener un talud (1H:1V) parte interna y (2H:1V) parte externa. Ver figuras 4 y 5.

El diseño de vaso N.º 01, en una primera etapa para operación del depósito de residuos inertes, se ha considerado la implementación del vaso N.º 01, dicho vaso considera la excavación del nivel actual de terreno natural hasta la cota 3512 msnm, generando un volumen de corte de 134,868 m³ y un volumen de relleno de 12,926 m³ para alcanzar la plataforma proyectada. El diseño de vaso N.º 02, en una segunda etapa del proyecto para operación del depósito de residuos inertes, se ha considerado la implementación del vaso N.º 02, dicho vaso considera la excavación del nivel actual de terreno natural hasta la cota 3,520 msnm, generando un volumen de corte de 177,573 m³ para alcanzar la plataforma proyectada, ambos vasos serán impermeabilizados.

IV. DISCUSIÓN

En la investigación es muy importante tener consideración del nuevo diseño de depósito de relave, su característica más relevante es su facilidad para depositar el relave que existe en Ticapampa, que será encapsulado e impermeabilizado para minimizar la contaminación. Para determinar el diseño del depósito de relave se realizó la siguiente secuencia en las actividades: primero, fue recopilar datos informativos; segundo, fue la investigación de campo; tercero, fue realizar los ensayos de laboratorio y quinto, fueron los trabajos de gabinete.

Por los datos tomados de Romero, A., Medina, R., & Flores, S. (2012), donde determinaron mineralogía con muestras de relaves por Difracción de Rayos X (DRX), con excesivas cantidades de sulfuros metálicos de galena y pirita, estos sulfuros vienen generando aguas ácidas.

El diseño del cierre conceptual debe garantizar que la estructura debe ser estable físicamente, hidrológicamente y químicamente. La estabilidad física está garantizada con los resultados de los cálculos del talud de presa de arranque y terraplén de residuos inertes, que son estables para las condiciones estáticas y pseudoestáticas para sismos con retornos en un período de 500 años. La estabilidad hidrológica considera las obras hidráulicas diseñadas para captar y conducir las avenidas de los máximos caudales, cuyo diseño está garantizado con el canal de coronación

propuesto. La estabilidad química del depósito de residuos inertes considera el diseño adecuado de cobertura y revegetación, conforme al manual de diseño de coberturas controladas por el Ministerio de Energía y Minas (MEM) con cobertura implementada conforme a la condición de probabilidad de no generación de drenaje ácido de los materiales existentes, se muestra en la Tabla 7.

Para el replanteo de puntos topográficos de las estructuras se cuenta con un levantamiento topográfico, a partir de dos (02) puntos de control geodésico denominado TPP1 y TPP2; de los cuales se establecieron 08 estaciones topográficas con base en el sistema de coordenadas PSAD-56. Del estudio de peligro sísmico se indica que la sismicidad histórica en el área del depósito de residuos inertes de Ticapampa, en provincia de Recuay, departamento de Ancash, se han producido intensidades de VII grados en la escala Mercalli modificada. El área proyectada del depósito de residuos inertes de Ticapampa, para 50 años, 100 años, 150 años y 500 años para un período de varios años de retorno, se observa en la Tabla 8.

Para los diseños de detalle del depósito de residuos inertes se ha empleado un valor más conservador igual a 2/3 del valor de la aceleración máxima esperada, igual a un valor de 0.17 con 500 años para un período de retorno.

La zona de investigación de depósitos de residuos inertes de Ticapampa se emplaza sobre terrazas aluvionales, producto de la actividad glaciaria antigua (pleistoceno), constituido por arenas, gravillas, gravas y cantos. En el área cercana a la investigación se encontró evidencias de un antiguo depósito calcáreo (travertinos y mármol) en el relleno sanitario de la municipalidad del distrito, ubicado al costado del área de estudio (a unos 6.00 m aproximadamente de los límites de Cía. Minera Yahuarcocha), estos han sido explotados y abandonados. También se encontró afloramientos de travertinos y mármol en la parte occidental de la quebrada Colea Racra, a unos 500 metros aproximadamente del proyecto; actualmente este sector se usa como cantera. Cabe resaltar que, los depósitos calcáreos reconocidos en las inmediaciones del proyecto no representan algún riesgo para la construcción del depósito de residuos inertes, ya que en los perfiles sísmicos no se ha evidenciado procesos de karstificación en el subsuelo. Los eventos geodinámicos son de mayor intensidad en el lado oriental del río Santa (frente al proyecto) debido a la acción glaciaria; por lo tanto, no tienen mayor relevancia en la dinámica de la zona donde se realiza la investigación. En el área de investigación (hacia el norte) destaca la presencia de la quebrada Colea Racra, su nacimiento procede de la cordillera Negra. Producto de la desglaciación presenta caudal constante y transporta material aluvial (clastos y cantos) que desemboca en el río Santa. No representa eventos que alteren la estabilidad física de la investigación a excepción que ocurra un evento extremo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en campo, los valores de velocidad son bajos para la capa superficial, con un nivel de compactación bajo correspondiente al suelo superficial. La segunda capa intermedia, corresponde a un material con un estado medianamente semiconsolidado. La tercera capa profunda, corresponde a un material con

un mayor estado de consolidación y probable presencia de agua en esta capa.

Del mismo modo, en la recomendación, en el proceso de perforación de logueo se debe definir las anomalías correspondientes a estratos; con la finalidad de evaluar los espesores definidos; de acuerdo con los ensayos geotécnicos de campo y laboratorio analizados, muestran que la matriz del suelo de cimentación en el sector izquierdo del depósito proyectado es no plástica, de baja compresibilidad y baja humedad; la densidad determinada en condición natural, indica suelos medianamente densos. La matriz del suelo de cimentación en el sector central del depósito proyectado es no plástica, de baja compresibilidad y baja humedad. La densidad determinada en condición natural, indica suelos densos. La matriz del suelo de cimentación en el sector derecho del depósito proyectado es ligeramente plástica, de baja compresibilidad y baja humedad, la densidad determinada en condición natural, indica suelos densos.

Para el estudio hidrológico se ha empleado la estación meteorológica Recuay ubicada a una altitud de 3,444.00 msnm con períodos de registro de 1,998 al 2,012. Se realizó la subdivisión de la cuenca mayor en dos subcuencas menores connotadas con SC-1 y SC-2. Cabe resaltar que la incidencia en el depósito proyectado corresponde a

una parte de la subcuenca menor denominado SC-2, con una extensión de drenaje de 1.22 kilómetros cuadrados, aportando un caudal de 5.49 m³/s. Mientras que el área de drenaje para el depósito proyectado es de 0.70 kilómetros cuadrados aportando un caudal de 3.19 m³/s, valor con el que se diseñó el canal de coronación para avenidas extraordinarias. Para el establecimiento del modelo del flujo de agua subterránea se requiere conocer y definir con pruebas sustentadas en campo (superficiales y en profundidad), las características hidrogeológicas y permeabilidades de los suelos o materiales que conforman las secciones de análisis.

Se ha elaborado una sección típica a lo largo del depósito de residuos inertes proyectado, con el modelo hidrogeológico construido en base a la información geológica local, el estudio geofísico mediante sondajes eléctricos verticales y las calicatas ejecutadas hasta una profundidad de 3.00 metros lineales. Las perforaciones diamantinas con pruebas de permeabilidad (Lugeon y/o Lefranc), así como la instalación de piezómetros hidráulicos; se realizarán durante la fase constructiva. De los cálculos efectuados se observa que el caudal de infiltración que ingresará al depósito de residuos inertes proveniente de las aguas subterráneas es igual a 12.5 lt/s, con el que se diseñó el sistema de subdrenaje. Ver Tabla 9.

Figura 4
Plano en planta de diseño (Disposición General).

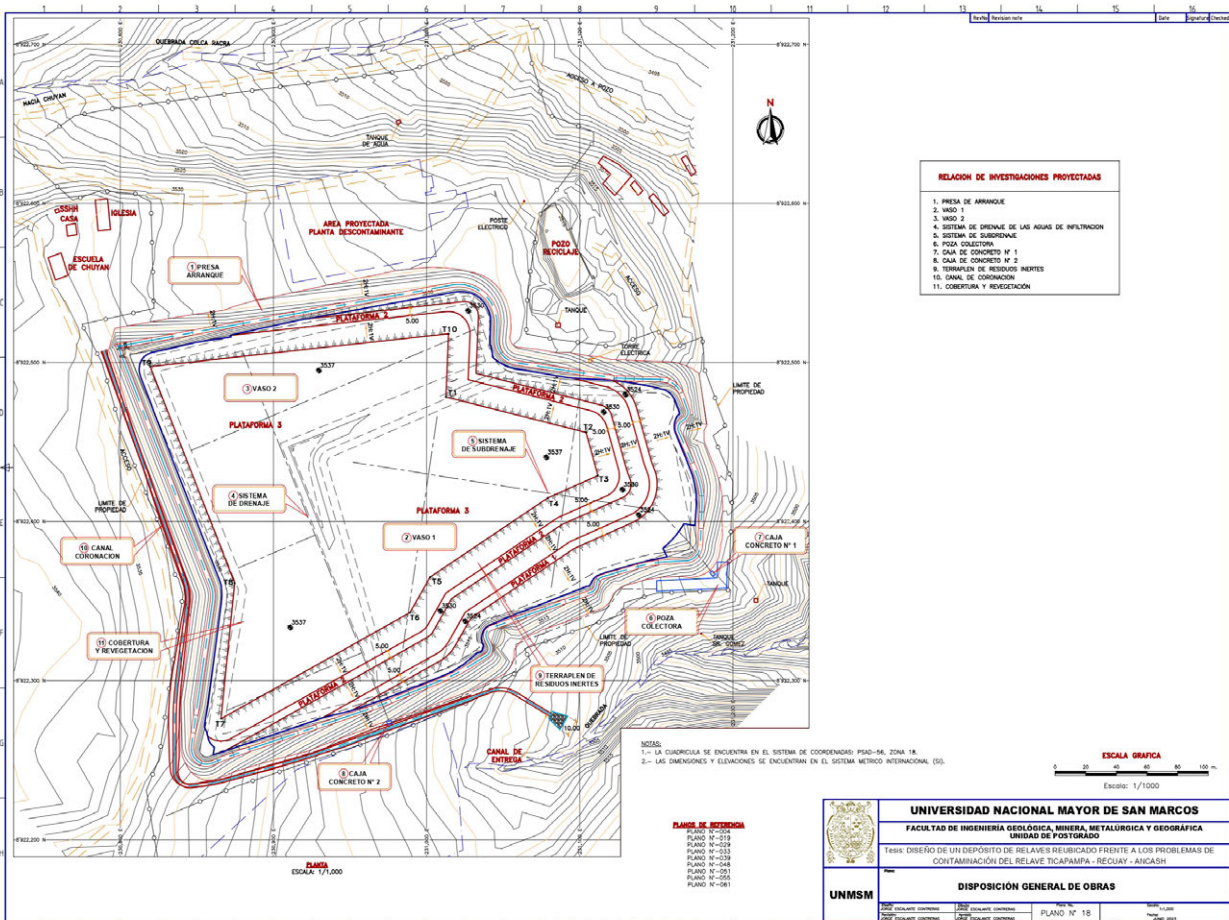


Figura 5
Plano en planta de diseño (Presa de arranque).

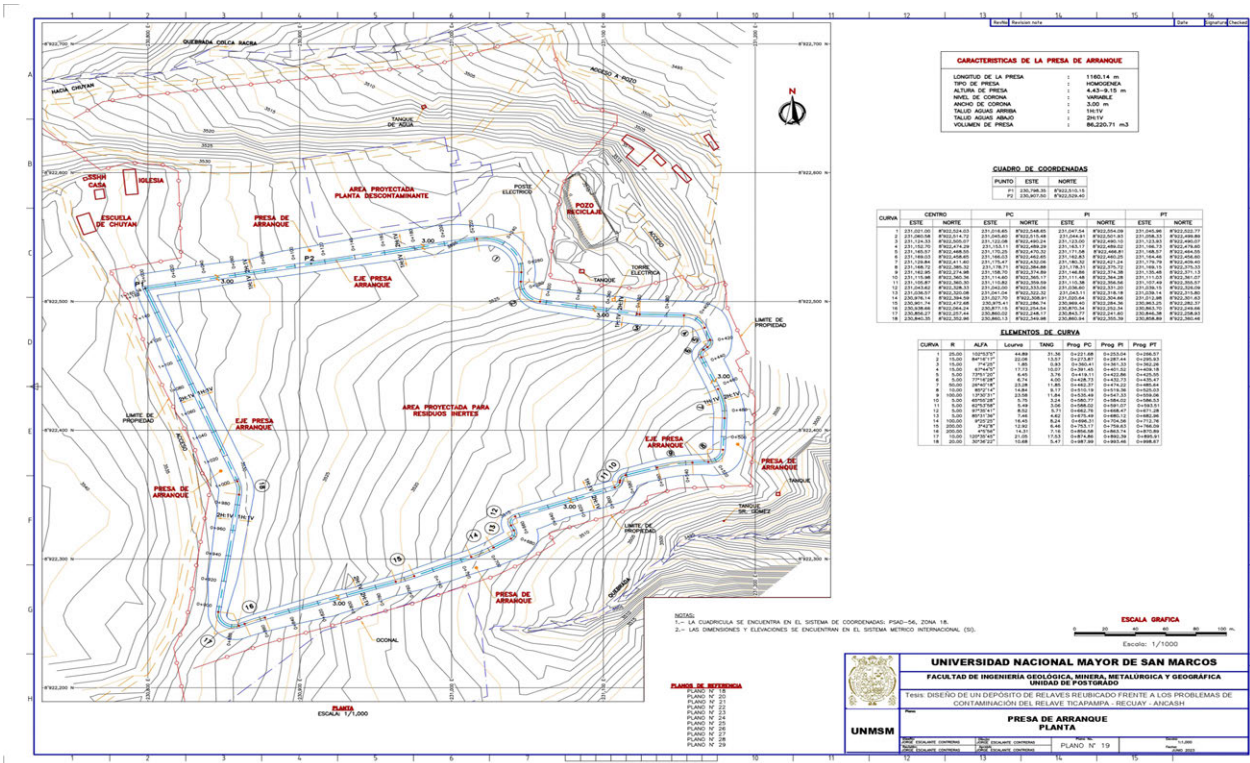


Tabla 7
Características de cobertura de residuos inertes.

Material	Espesor (m)
Grava arcillosa (40% de arcilla)	0.40
Tierra vegetal	0.20
Estiércol de ovino	0.05
Vegetación a implantar	De la zona

Tabla 8
Aceleraciones máximas esperadas para la zona del proyecto.

Periodo de Retorno en Años	Aceleración Máxima Esperada en "g"	Probabilidad Anual de Excedencia
50	0.12	2.0 X 10-2
100	0.16	1.0 X 10-2
150	0.18	6.6 X 10-3
500	0.26	2.0 X 10-3

Tabla 9
Análisis de Estabilidad

Estructura	Tipo de Análisis	FACTOR DE SEGURIDAD	
		ANÁLISIS ESTÁTICO	ANÁLISIS SEUDOESTÁTICO (a = 0.17g)
Dique de arranque	Local	1.579	1.809
Terraplén 1 + dique de arranque	Local	1.542	1.590
Terraplenes 1, 2 + dique de arranque	Local	1.580	1.426
Terraplenes 1, 2, 3 +dique de arranque	Local	1.595	1.300
Terraplenes 1, 2, 3 +dique de arranque	Global	1.790	1.280

V. CONCLUSIONES

- En Ticapampa, se identificó 1'043,000.53 metros cúbicos de volumen de relave, un contaminante contundente, por ende, con la finalidad de mitigar la contaminación se diseñó un depósito nuevo de relave impermeable.
- Se realizó una investigación geológica, geomorfológica y geodinámica de Ticapampa, identificando el volumen de depósito de relave por donde discurren los flujos de relave con sulfuros, eventos ocurridos en épocas de precipitación pluvial.
- La zona del área del nuevo depósito de residuos inertes Ticapampa se emplaza sobre terrazas aluvionales, producto de la actividad glaciaria antigua (pleistoceno), constituido por arenas, gravillas, gravas y cantos rodados.
- En el diseño del nuevo depósito de relave se consideró la geomembrana HDPE de un espesor de 1.50 mm, que se instalará por encima de un geotextil en condiciones no tejidas de 400 gr/m² con el objetivo fundamental de mejorar la infiltración y transporte del material relave, que generan aguas ácidas y contaminan la parte inferior, la finalidad es la impermeabilización del nuevo diseño de depósito de relaves.

partir de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/390>.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflictos de intereses

VI. REFERENCIA

- Camino (2021). Estudio experimental del transporte de relave en un lecho de grava en el marco de la evaluación de la contaminación de ríos por accidentes mineros, experimentos con un tomógrafo. [Tesis de Maestría, Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería civil]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180222>
- Barja, M. (2013), Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Cuarta edición, ISBN: 978-1-111-57675-2.
- Chira, J. (2021). Impacto de los metales pesados del río Mantaro en la aptitud de los suelos agrícolas del sector Jauja-Huancayo, Junín, 2020. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/17054>.
- Hernández, S., Fernández, C., y Baptista, L. (2010), Metodología de la investigación. 5ta, Edición, mexicana: Mc. Graw-Hill, Educación; Reg. Núm. ISBN: 978-607-15-0291-9.
- Ramírez (2020). Metodología para la evaluación de la susceptibilidad de erosión y potenciales inestabilidades físicas en depósitos de relaves. [Tesis de Maestría, Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Geología]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174203>.
- Romero, A., Medina, R., & Flores, S. (2012). Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa. Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas. Recuperado a