



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

***Biocementación de relaves mineros para la elaboración  
eco-amigable de fachaletas***

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

**Autor:** Villavicencio Morales, Erick Steven

**Directora:** Jumbo Flores, Diana Carolina

LOJA

2025



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2025

## **Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular**

Loja, 14 de marzo de 2025

Magíster

Mercedes Villa Achupallas

**Directora de la carrera de Ingeniería Ambiental**

Ciudad.-

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Integración Curricular denominado: Biocementación de relaves mineros para la elaboración eco-amigable de fachaletas realizado por Erick Steven Villavicencio Morales ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la Universidad, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Directora: Diana Carolina Jumbo Flores, Magíster

Director del Trabajo de Integración Curricular

C.I.: 1104114119

Correo electrónico: dcjumbo07@utpl.edu.ec

### **Declaración de autoría y cesión de derechos**

Yo, Erick Steven Villavicencio Morales completos, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: Biocementación de relaves mineros para la elaboración eco-amigable de fachaletas, de la carrera de Ingeniería Ambiental, específicamente de los contenidos comprendidos en: Introducción, Capítulo 1 marco teórico, Capítulo 2 materiales y métodos y Capítulo 3 resultados y discusión, conclusiones y recomendaciones, siendo Diana Carolina Jumbo Flores, directora del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual de este trabajo.

Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad", en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja queda facultada para ingresar el presente trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

.....

Autor: Erick Steven Villavicencio Morales

C.I.:1105333494

Correo electrónico: [esvillavicencio2@utpl.edu.ec](mailto:esvillavicencio2@utpl.edu.ec)

### **Dedicatoria**

A mis padres, Sonia Morales y Jorge Villavicencio. Este logro es una evidencia de su inmenso amor y dedicación. Valoro mucho las lecciones que me han impartido a lo largo de mi vida en todos los ámbitos y por el cariño que siempre me han brindado. Esta tesis es un tributo a su legado y a la gran admiración que siento por ustedes.

A mis abuelitos, María Iza y Carlos Morales, que desde mi niñez velaron por mi salud y éxito, por cuidarme desde que tengo memoria a pesar de los errores que he cometido y cuya sabiduría me enseñó como ser buena persona.

## **Agradecimiento**

Agradezco a mi familia por brindarme los recursos para poder estudiar y alcanzar este gran logro en mi vida estudiantil, por apoyarme emocionalmente en las diversas situaciones adversas que me han pasado y poder continuar adelante mejor de lo que ya soy y aprendiendo de ellas.

A mi directora de tesis, la Mgr Diana Jumbo. Por su experiencia, comprensión y paciencia que tuvo conmigo en todo este periodo de estudio. A su guía constante y su fe en mis habilidades me han ayudado a poder terminar este importante proyecto en mi vida.

## Índice de contenido

Carátula .....	I
Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular .....	II
Declaración de autoría y cesión de derechos .....	III
Dedicatoria .....	V
Agradecimiento .....	VI
Índice de contenido .....	VII
Resumen.....	1
Abstract .....	2
Introducción .....	3
Capítulo uno.....	5
Marco Teórico .....	5
1.1 Minería .....	5
1.1.1 <i>Residuos mineros</i> .....	5
1.2 Relaves .....	5
1.2.1 <i>Composición</i> .....	6
1.2.2 <i>Relave ras</i> .....	6
1.2.3 <i>Tratamientos</i> .....	6
1.3 Reaprovechamiento de residuos mineros .....	8
1.3.1 <i>Fachaletas</i> .....	8
1.3.2 <i>Baldosas</i> .....	9
1.4 Huella de carbono .....	9
1.5 Marco Legal .....	10
1.5.1 <i>Código orgánico del ambiente (COA)</i> .....	10
1.5.2 <i>Ley de minería</i> .....	10
Capítulo dos .....	11
Materiales y métodos.....	11
2.1 Zona de estudio y toma de muestras .....	11

<b>2.2</b>	<b>Caracterización de parámetros fisicoquímicos del relave .....</b>	<b>12</b>
2.2.1	<i>pH</i> .....	12
2.2.2	<i>Conductividad eléctrica</i> .....	12
2.2.3	<i>Carbonatos</i> .....	12
2.2.4	<i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC)</i> .....	12
2.2.5	<i>Metales</i> .....	13
2.2.6	<i>Límites de Atterberg</i> .....	14
<b>2.3</b>	<b>Caracterización de parámetros mecánicos del relave.....</b>	<b>15</b>
2.3.1	<i>Ensayo de compresión simple</i> .....	15
2.3.2	<i>Ensayo de resistencia a la flexión</i> .....	15
2.3.3	<i>Resistencia al fuego</i> .....	15
2.3.4	<i>Resistencia abrasión</i> .....	16
<b>2.4</b>	<b>Mantenimiento de bacteria .....</b>	<b>16</b>
<b>2.5</b>	<b>Prototipo de fachaletas.....</b>	<b>16</b>
2.5.1	<i>Presión de confinamiento</i> .....	16
2.5.2	<i>Fluidez</i> .....	16
2.5.3	<i>Tiempo de curado</i> .....	17
2.5.4	<i>Forma de curado</i> .....	17
2.5.5	<i>Tratamiento biológico fortalecido con cemento</i> .....	17
<b>2.6</b>	<b>Evaluación del desempeño de los fachaletas producidas a partir de relaves mineros considerando la huella de carbono.....</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo tres .....</b>		<b>19</b>
<b>Resultados .....</b>		<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterización fisicoquímica.....</b>	<b>19</b>
3.1.1	<i>Potencial de hidrógeno (pH)</i> .....	19
3.1.2	<i>Conductividad eléctrica</i> .....	20
3.1.3	<i>Carbonatos</i> .....	21
3.1.4	<i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC)</i> .....	22

3.1.5	<i>Límites de Atterberg</i> .....	23
3.1.6	<i>Fluorescencia de Rayos X (FRX)</i> .....	25
3.1.7	<i>Difracción de Rayos X (DRX)</i> .....	26
3.1.8	<i>Bases</i> .....	27
3.1.9	<i>Metales pesados</i> .....	28
3.2	<b>Caracterización mecánica</b> .....	32
3.2.1	<i>Resistencia al fuego</i> .....	32
3.2.2	<i>Compresión simple</i> .....	33
3.2.3	<i>Flexión</i> .....	35
3.2.4	<i>Abrasión cualitativa</i> .....	37
3.3	<b>Análisis de huella de carbono</b> .....	37
3.4	<b>Discusión</b> .....	39
	<b>Conclusiones</b> .....	47
	<b>Recomendaciones</b> .....	48
	<b>Referencias</b> .....	49
	<b>Apéndice</b> .....	61
	<b>Apéndice A. Compresión simple</b> .....	61
	<b>Apéndice B. Resistencia a la flexión</b> .....	61
	<b>Apéndice C. Resistencia a la ignición</b> .....	61
	<b>Apéndice D. Resistencia a la abrasión cualitativa</b> .....	62
	<b>Apéndice E. Parámetro potencial de hidrogeno</b> .....	62
	<b>Apéndice F. Parámetro conductividad</b> .....	63
	<b>Apéndice G. Parámetro metales</b> .....	63
	<b>Apéndice H. Porcentaje de sodio intercambiable</b> .....	64
	<b>Apéndice I. Porcentaje partículas del suelo</b> .....	64

**Índice de tablas**

<b>Tabla 1</b>	<b>Insumos utilizados junto a sus factores de emisión .....</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 2</b>	<b>Índice de plasticidad de las muestras .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 3</b>	<b>Minerales presentes en los relaves mineros .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 4</b>	<b>Análisis de resistencia al fuego.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 5</b>	<b>Clasificación de morteros según la norma ASTM C270.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 6</b>	<b>Resultados de resistencia en fachaletas.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 7</b>	<b>Resultados de abrasión cualitativa .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 8</b>	<b>Huella de carbono en 1 fachaleta con tratamiento biológico-cemento.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 9</b>	<b>Huella de carbono de 1 fachaleta comercial .....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 10</b>	<b>Huella de carbono de 1 fachaleta con tratamiento biológico .....</b>	<b>38</b>

**Índice de figuras**

<b>Figura 1</b>	<b>Área de estudio .....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 2</b>	<b>Resultados análisis pH .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 3</b>	<b>Resultados análisis de conductividad eléctrica.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 4</b>	<b>Resultados análisis carbonatos .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 5</b>	<b>Resultados análisis de intercambio catiónico .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 6</b>	<b>Resultados de los límites de Atterberg .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 7</b>	<b>Resultados de compuestos mayoritarios de FRX.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 8</b>	<b>Resultados de bases intercambiables .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 9</b>	<b>Resultado de hierro.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 10</b>	<b>Resultado de cobre .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 11</b>	<b>Resultado de níquel .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 12</b>	<b>Resultados de cadmio .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 13</b>	<b>Resultados de zinc.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 14</b>	<b>Resultados de resistencia al fuego.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 15</b>	<b>Resultados de compresión simple.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 16</b>	<b>Resultados de la fuerza máxima (N) .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 17</b>	<b>Resultados resistencia a la flexión .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 18</b>	<b>Comparación de huella de carbono .....</b>	<b>39</b>

## Resumen

La minería genera alto impacto ambiental debido a que solo un 1 % del material extraído es considerado mineral de interés y el resto es considerado residuo, por ende, se busca reaprovechar estos recursos como materia prima para nuevos materiales de construcción. En este estudio se utilizaron dos tratamientos: uno biológico (*Sporosarcina pasteurii*) y otro combinado (*Sporosarcina pasteurii* y cemento) para generar nuevos materiales de construcción (fachaletas). El relave (filtrado y no filtrado) para los prototipos se lo obtuvo de la empresa Lunding Gold y se realizó una caracterización fisicoquímica y mecánica. Los resultados evidencian que las probetas con tratamiento biológico y combinado obtuvieron 1.84 MPa y 5.31 MPa respectivamente de resistencia a la compresión simple que es mayor a la probeta control de relave con 1.08 MPa y a probetas elaboradas en estudios similares donde alcanzan un 0.2 MPa en relaves biocementados con *Sporosarcina pasteurii*. En cuanto a la resistencia a la flexión, para ambos tratamientos se obtuvo un 1.27 MPa, resultando inferior a fachaletas comerciales (6 MPa). En cuanto a la huella de carbono de las fachaletas elaboradas con tratamiento biológico y combinado se obtuvo una emisión de 0.02 y 0.004 kgCO<sub>2</sub>e en comparación con las fachaletas convencionales que tienen 1.01 kgCO<sub>2</sub>e.

*Palabras clave:* Relave, *Sporosarcina pasteurii*, huella de carbono, fachaleta, compresión simple

### Abstract

Mining generates a high environmental impact because only 1% of the extracted material is considered a mineral of interest and the rest is considered waste, therefore, the aim is to reuse these resources as raw material for new construction materials. In this study, two treatments were used: one biological (*Sporosarcina pasteurii*) and another combined (*Sporosarcina pasteurii* and cement) to generate new construction materials (facades). The tailings (filtered and unfiltered) for the prototypes were obtained from the company Lunding Gold and a physicochemical and mechanical characterization was carried out. The results show that the specimens with biological and combined treatment obtained 1.84 MPa and 5.31 MPa respectively of simple compressive strength, which is greater than the control tailings specimen with 1.08 MPa and specimens prepared in similar studies where they reach 0.2 MPa in tailings biocemented with *Sporosarcina pasteurii*. As for the flexural strength, both treatments yielded 1.27 MPa, which is lower than commercial veneers (6 MPa). As for the carbon footprint of the veneers produced with biological and combined treatment, emissions of 0.02 and 0.004 kgCO<sub>2</sub>e were obtained compared to conventional veneers, which have 1.01 kgCO<sub>2</sub>e.

Keywords: Tailings, *Sporosarcina pasteurii*, carbon footprint, slab, simple compression

## Introducción

La minería es considerada una actividad económica basada en la extracción y aprovechamiento de minerales encontrados en la superficie terrestre. Esta actividad se ha desarrollado en Ecuador desde el año 1500 y actualmente representa el 1.6% del producto interno bruto del país (planetGOLD, 2022). Es así que el Ecuador tiene un alto potencial minero dadas sus reservas de yacimientos minerales, una prueba de esto es que los productos mineros están en el cuarto lugar de las exportaciones, sin embargo, el resultado de realizar esta actividad es la generación de residuos denominados relaves, en donde si existe un manejo inadecuado generan afectaciones al entorno (Acosta, 2021).

Según ICMM (2020) los relaves son "un subproducto común del proceso de recuperación de los metales y los minerales. En general, consiste en un lodo compuesto de agua y partículas finas de metales y minerales. Se crea cuando el mineral extraído se tritura y se muele finamente en el proceso de molienda". Adicionalmente, poseen los químicos aplicados en el proceso de recuperación y partículas de metales pesados como arsénico, cianuro, cobre, zinc, plomo y cromo.

La producción de relaves a nivel mundial es de aproximadamente 20 a 25 mil millones de toneladas de relave por año (Jiang et al., 2020), dado que los metales de interés se encuentran en bajas concentraciones dentro de la corteza terrestre. Dada la gran producción de relaves, se los almacena en relaveras que ocupan grandes extensiones de terreno y generan amenazas hacia las poblaciones circundantes ya sea por deslizamiento o por fallas sísmicas, un ejemplo de esto es el colapso de la mina Córrego de Feijao en Brasil (Acosta, 2021).

Actualmente, existen varias alternativas más sostenibles para la disposición final de estos residuos como es la transformación de relaves mineros en insumos para la construcción con el fin de reducir el volumen de estos en el ambiente (Cárcamo, 2019). Se pueden elaborar baldosas y ladrillos de relaves metálicos polimetálicos mediante micro encapsulamiento y fijación química con el fin de estabilizar metales peligrosos y contaminantes (Romero & Flores, 2014), así mismo elaborar adoquines mediante la geo polimerización para obtener

compuestos ricos en sílice y alúmina los cuales remplazan al cemento y las arcillas en la fabricación del producto (Castro, 2018). También otros productos como: extensores de pinturas de relaves ricos en cobre, vidrio de relaves ultramaficos, para el tratamiento de aguas residuales de relaves ricos en flogopita, silvicultura de relaves ricos de manganeso entre otros (Naranjo, 2020).

Dentro de la industria minera con el fin de tratar los relaves se ha aplicado la precipitación de carbonato inducida por microorganismos (MICP). Este es un proceso de biomineralización que precipita carbonato de calcio a partir de la hidrólisis de la urea, pero dentro del ámbito minero este precipita el metal unido al carbonato, la bacteria ocupada para este fin es la *Sporosarcina pasteurii*, esta se encuentra naturalmente en suelos y sedimentos por lo que no causa enfermedades humanas (Bascañán, 2022).

En el sur del Ecuador, específicamente en la provincia de Zamora Chinchipe, se encuentra la compañía minera aurífera canadiense Lundin Gold con el proyecto Fruta del Norte. En su proceso de producción genera dos tipos de relaves, el primero es el relave no filtrado, es aquel que se obtiene de la extracción de mineral y es almacenado en los depósitos de relaves mientras que el segundo es el relave filtrado que se transforma en pasta de relleno combinándolo con cemento, esta pasta es ocupada para la estabilización de la mina en las cámaras subterráneas (Cardno, 2018).

Por lo antes mencionado, en el presente estudio se elaboraron fachaletas eco-amigables a base de relaves (filtrado y no filtrado) obtenidos de la empresa Lundin Gold, que fueron biocementados mediante dos métodos: biológico (*Sporosarcina pasteurii*) y el otro combinado, entre biológico y químico (*Sporosarcina pasteurii* y cemento), con el fin de reutilizar estos residuos reduciendo su impacto ambiental y mejorando la economía circular, así mismo reducir la huella de carbono en comparación a la de las fachaletas convencionales.

## Capítulo uno

### Marco Teórico

#### 1.1 Minería

La actividad minera permite la extracción y obtención de minerales de interés en estado sólido, líquido o gaseoso, presentes en el suelo y subsuelo, con el fin de transformarlos en materias primas, para cubrir las necesidades de desarrollo humano (Herrera, 2017).

Esta actividad genera gran impacto en el entorno, por lo tanto, una manera de minimizarlo es a través de la minería subterránea, la cual es tecnológicamente eficiente, viable económicamente y toma en cuenta los objetivos de desarrollo sostenible, en comparación con la minería a cielo abierto (Herrera, 2019).

##### 1.1.1 *Residuos mineros*

La actividad minera genera grandes cantidades de residuos, procedentes de la explotación y extracción, ya que los minerales de interés son de aproximadamente un 1% de lo extraído (Pandavenes et al., 2023), dentro de los más relevantes están las escombreras y los relaves. Este último considerado peligroso debido a su composición ya que pueden contener reactivos químicos, metaloides, metales, etc. (Cordero et al., 2022).

Dentro de las distintas fases se producen residuos. En la fase de extracción se genera principalmente material estéril, es decir, material sin valor económico que se extrae para permitir la explotación del mineral principal (Garcés, 2017). Además, se generan los efluentes de los diferentes tipos de tratamiento aplicados. En el caso de la flotación, se producen lodos residuales compuestos por una suspensión acuosa, por lixiviación, donde se produce material triturado y tratado mediante un agente lixivante y por fundición los cuales están compuestos por escorias vítreas, lodos y polvos de humo, es decir, material particulado compuesto por metales pesados (Romero, 2007).

#### 1.2 Relaves

Los relaves son generados por los procesos de: cianuración, desmonte de mina, escorias, residuos de pilas de lixiviación, carbón de pulpa, etc (Sánchez, 2019). Estos se

componen por el propio material de la mina del cual ya se extrajo la parte del material de interés (Beltrán et al., 2018)

### **1.2.1 Composición**

La composición de los relaves es variada porque dependen del tipo de yacimiento del que provienen. Tal es el caso de los relaves que proceden de una geología tipo skarn, tienen una composición mineralógica de cuarzo, de albita y anortita, y en cuanto a la composición química poseen óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Lalangui & Méndez, 2021).

En el estudio realizado por Sánchez (2019), el relave minero de la planta de beneficio de Santa Lucía, presentó cuarzo, limonita y plagioclasa dentro de su mineralogía, y en su composición química poseía por silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Así mismo, un estudio sobre los relaves de La Ciénaga realizado por Manrique & Agurto (2022), menciona que la composición mineralógica está conformada por cuarzo, pirita, yeso, albita, entre otros. Por lo tanto, basado con los estudios antes mencionados, los relaves están compuestos generalmente por cuarzo, es decir, por óxido de silicio y óxido de aluminio

### **1.2.2 Relaveras**

Los relaves son almacenados en las relaveras. Estas ocupan grandes áreas de terreno por lo que son conocidas como unas de las estructuras artificiales más grandes del mundo, sin embargo, presentan varios riesgos al medio ambiente, comunidades cercanas, y viabilidad económica de la empresa (Olguín et al., 2022).

Las relaveras son un riesgo constante ya sea por su capacidad de general drenaje ácido de minas, en yacimientos con presencia de sulfuros o por roturas en las presas de contención ocasionada por su inestabilidad produciendo el vertido del material en grandes extensiones de terreno. Generando alteraciones al entorno y en algunas ocasiones pérdidas humanas como se dio en el caso Brumadinho Brasil (Moreno, 2023).

### **1.2.3 Tratamientos**

La actividad minera no es totalmente eficiente, por lo tanto, no son capaces de recuperar todos los agentes y químicos usados en los procesos de extracción que son

llevados a las relaveras y no ofrecen ningún agregado económico a la empresa, además, la normativa ambiental se ha endurecido debido a los riesgos de corto y largo plazo relacionados al almacenamiento de metales pesados y químicos en grandes cantidades (Cavero, 2017),

Los materiales depositados en las relaveras reaccionan entre sí generando drenaje ácido de mina a partir de la reacción de pirita con agua y oxígeno (F.C & Sernageomin, 2015).

Por lo antes mencionado, es necesario realizar diversos tratamientos, ya sean físicos, químicos o biológicos con el fin de no generar afectaciones al ambiente o salud humana o incluso obtener productos de valor agregado al utilizar los residuos mineros como materia prima para elaborar materiales de construcción.

La estabilización química, se basa en tratamientos a los residuos mineros para que no sufran alteraciones químicas que puedan afectar al entorno ya que los relaves al estar en diversas condiciones ambientales se vuelven inestables (Bastías, 2014).

Con el fin de evitar inundaciones producto de rupturas de relaveras, se lleva a cabo la deshidratación de relaves, al eliminar la laguna superficial producto de la sedimentación fortalece la estabilidad física del relave, disminuye la capacidad de producir drenaje minero y reduce su capacidad de flujo ante rupturas, además, disminuye el volumen de almacenamiento en las relaveras, generando un menor impacto al entorno (Bruton & Purrington, 2023).

Así mismo como menciona Espín et al. (2021), para la estabilización de relaves y retención de metales pesados, se implementa la fitorremediación como tratamiento biológico, que consiste en el uso de especies vegetales para biodegradar los compuestos presentes en el relave y dar resistencia estructural al almacenamiento de los mismos.

**A. Biocementación.** Es el proceso por el cual se unen las partículas del suelo con minerales y otras sustancias, fortaleciendo las propiedades físicas del suelo mediante la acción de químicos o microorganismos (Arrieta et al., 2019). Este proceso se utiliza dentro de la minería para la estabilización de relaves mediante la bioprecipitación de calcita inducida por microorganismos (MICP). Forma carbonatos de calcio que funcionan como material cementante, y permite la remediación de aguas y la estabilización fisicoquímica de

relaves (CETAQUA, 2021), además, este método tiene menor gasto energético y económico respecto a los métodos convencionales y de menor impacto ambiental (Fu et al., 2023).

Como menciona Ruíz (2020), se ha propuesto varias cepas bacterianas para poder precipitar gran volumen de carbonatos entre ellas están los microorganismos fotosintéticos, bacterias reductoras de sulfatos, bacterias que participan en el ciclo del nitrógeno, sin embargo, las bacterias ureolíticas tienen la capacidad de generar mayor cantidad de carbonatos.

- ***Sporosarcina pasteurii***: Es una bacteria que se encuentra naturalmente en suelos y sedimentos. Tiene la capacidad de precipitar carbonato de calcio mediante hidrólisis de urea, a pesar de que existen varias bacterias que realizan este proceso, *Sporosarcina pasteurii* no causa enfermedades humanas y presenta una amplia producción de ureasa y cristalización de carbonato de calcio (Bascañán, 2022). Además, puede eliminar los metales pesados ya que al formar el carbonato de calcio se incorporan en la estructura cristalina y quedan retenidos, esto produce un ahorro en los costos de adquisición de bases utilizados para precipitarlos (Acuña et al., 2018).

### 1.3 Reaprovechamiento de residuos mineros

Dado de que los relaves son almacenados en grandes extensiones de terreno, se buscan alternativas sostenibles para la disposición de estos residuos y poder utilizarlos en diferentes ámbitos industriales, uno de estos es transformarlo en materiales de construcción y darle un valor agregado (Acosta, 2021).

#### 1.3.1 *Fachaletas*

Una manera de reaprovechar este material como agregado es en la elaboración de fachaletas, estas son piezas cerámicas que representan materiales naturales como son la piedra o madera (Organización Corona, 2024). Generar este tipo de productos no solo beneficia a la industria minera mediante el manejo sostenible de los residuos mineros, sino también al sector de las comunidades locales (La Hora, 2024).

### 1.3.2 Baldosas

Cómo menciona Baylón & Flores (2014), se pueden elaborar agregados de construcción no tóxicos, mediante procesos de encapsulamiento, microencapsulamiento y microcristalización de los metales pesado. Además, se han desarrollado metodologías que permiten elaborar baldosas a partir de este producto.

### 1.4 Huella de carbono

La huella de carbono es la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI), causadas por emisiones directas o indirectas de un individuo, organización o producto, esta se mide en CO<sub>2</sub> equivalente, como se ve en la ecuación 4. La huella de carbono es el resultado de multiplicar los datos de actividad por el factor de emisión (EBS, 2023)

$$\text{Emisión } CO_{2e} = \text{factor de emisión} * \text{datos de actividad} \quad \text{Ec 1}$$

El factor de emisión proporciona una aproximación del impacto ambiental de diferentes materiales, servicios, procesos y productos. Estos se refieren a la cantidad de CO<sub>2</sub>e que se emiten a la atmósfera por una unidad de referencia, estos factores de emisión se pueden encontrar en distintas bases de datos de código abierto como la "BEIS" perteneciente a Reino Unido y la del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Climate Partner, 2024).

Para calcular la huella de carbono, se realiza un análisis de ciclo de vida (ACV), donde detallan las diferentes etapas: Producción, uso y fin de vida. Dentro de la primera se evalúan las emisiones directas e indirectas de GEI generadas, como emisiones de combustibles fósiles usados en el transporte y producción, emisiones indirectas de la generación de electricidad para la producción; la segunda etapa, son las emisiones vinculadas al uso del producto, y la etapa final la evaluación de emisiones para su eliminación (SGS, 2023).

Como menciona REPSOL (2023), las emisiones de GEI se clasifican en 3 alcances:

- **Alcance 1:** Emisiones directas. Son las emisiones liberadas por la propia empresa en el lugar donde se produce la actividad
- **Alcance 2:** Emisiones indirectas: Son emisiones asociadas a la adquisición de energía eléctrica

- **Alcance 3:** Otras emisiones indirectas. Son emisiones GEI que ocurren en fuentes que no son propiedad ni están controladas por la empresa o persona.

## **1.5 Marco Legal**

### **1.5.1 *Código orgánico del ambiente (COA)***

En el artículo 1 del COA, se menciona que este código tiene por objeto garantizar el derecho de las personas a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, así como proteger los derechos de la naturaleza para la realización del buen vivir o sumak kawsay. Por tanto, la buena gestión de residuos mineros contribuye a evitar alteraciones a las diferentes matrices, las cuales afectaría la calidad de vida de las personas y del entorno que los rodea. Así mismo, en el artículo 226 del COA (2017), sobre la jerarquización en la gestión de residuos, se está aplicando el literal 3 sobre el aprovechamiento o valorización, ya que se está utilizando el relave como un agregado de construcción en la elaboración de fachaletas.

### **1.5.2 *Ley de minería***

Como menciona el artículo 43, se constituyen residuos minero-metalúrgicos los desmontes, escombreras, relaves, desechos y escorias resultantes de las actividades minero-metalúrgicas. Por tanto, los relaves forman parte de dichos residuos mineros, producto de las diferentes actividades dentro de la minería, y al formar parte accesoria de la concesión pueden ser aprovechados de la manera más conveniente para el titular.

Así mismo, los residuos mineros deben estar almacenados en estructuras que eviten la contaminación a las matrices agua, suelo y aire a largo plazo como lo menciona el artículo 81, por lo tanto, al utilizar estos residuos como agregados de construcción se reduciría el volumen de estos y evitaría que las estructuras estas sometidas al peso y generar posibles rupturas. En el Art. 81, menciona que los titulares de derechos mineros y mineros artesanales, para acumular residuos minero-metalúrgicos deben tomar estrictas precauciones que eviten la contaminación del suelo, agua, aire y/o biota de los lugares donde estos se depositen, en todas sus fases incluyendo la etapa de cierre, construyendo instalaciones como escombreras, rellenos de desechos, depósitos de relaves o represas u otras infraestructuras técnicamente diseñadas y construidas que garanticen un manejo seguro y a largo plazo.

## Capítulo dos

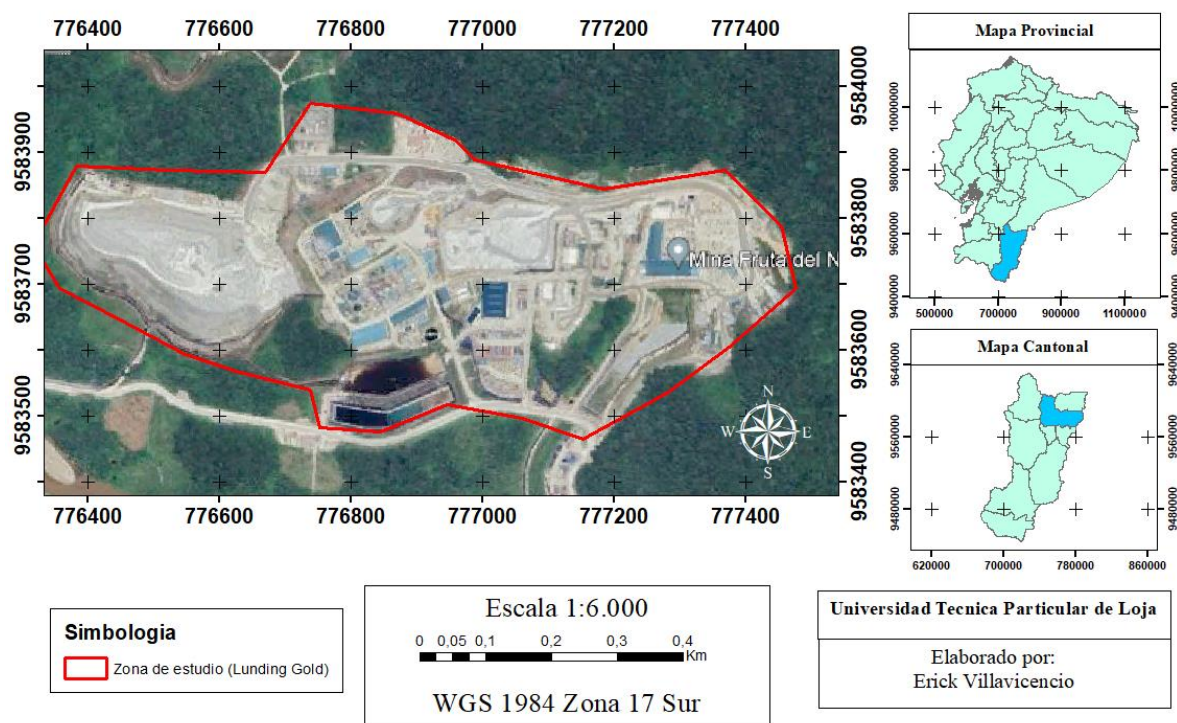
### Materiales y métodos

#### 2.1 Zona de estudio y toma de muestras

Las muestras de relave fueron obtenidas de la empresa Lundin Gold del proyecto Fruta del Norte (Imagen 1).

**Figura 1**

*Área de estudio*



Lundin Gold es una empresa minera canadiense, con su proyecto minero Fruta del Norte, se encuentra en la concesión minera El Zarza, propiedad de su filial Aurelian Ecuador S.A ubicado en parroquia Los Encuentros, cantón Yantzaza, provincia de Zamora Chinchipe (LUNDING GOLD, 2022), cuenta con un área de 5566 hectáreas y ha estado en producción desde el año 2019 y consta como una de las minas operación de mayor ley del mundo (LUNDING GOLD, 2023).

Esta minera produce dos tipos de relave, el convencional y el filtrado, el primero como se mencionó anteriormente es un sólido finamente molido descartado de operaciones

mineras (SERNAGEOMIN, 2023), mientras que el segundo es aquel que pasa por un proceso de filtración para extraer un 80 % de agua del relave (Quispe, 2021).

## **2.2 Caracterización de parámetros fisicoquímicos del relave**

Se determinaron los parámetros fisicoquímicos como: pH, conductividad, carbonatos, densidad, resistencia a la compresión, intercambio catiónico, límites de Atterberg entre otros.

### **2.2.1 pH**

Se realizó mediante el método ASTM D4972, en una relación 1:2.5 (masa/volumen). Se pesó 20 g de suelo, se agregó 50 ml de agua destilada, se mezcló por 5 minutos a 250 rpm (Mezclador horizontal marca GFL 3018), finalmente se midió el pH con el pH metro (Mettler Toledo modelo Seven Compact) previamente calibrado (Apéndice E).

### **2.2.2 Conductividad eléctrica**

Se determinó mediante la norma ISO 11265:1994, con una relación 1:2.5 (masa/volumen), se mezcló 20 g de relave con 50 ml de agua destilada, se colocó en agitación (Mezclador horizontal marca GFL 3018) por 30 minutos, posterior a esto se filtró la muestra y al pasante se midió la conductividad en el conductímetro (Mettler Toledo modelo Seven Compact) (apéndice F).

### **2.2.3 Carbonatos**

Para determinar carbonatos se utilizó el método de titulación de Glosolan de la FAO. Se pesó 5 g de relave, se agregó 50 ml de ácido clorhídrico (HCl) 1N y se calentó por 5 minutos hasta ebullición. Se dejó enfriar, se agregó 50 ml de agua destilada y 3 gotas de fenolftaleína (Fisher Chemical). Esto se tituló con hidróxido de sodio 1N (NaOH) (marca Emsure) hasta el cambio de color a rosa, con los datos de viraje obtenido se aplicó la siguiente ecuación, para determinar el porcentaje de carbonatos.

$$\%CaCO_3 = \frac{V_{HCl} - V_{NaOH} N_{NaOH}}{gr\ de\ relave} * 0.05 * 100 \quad Ec\ 2$$

### **2.2.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)**

Para realizar CIC se siguió el método de determinación mediante saturación con acetato de amonio. Se pesó 5 g de relave, se añadió 40 ml de acetato de amonio (C<sub>2</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>)

(marca Tm Media) y se agitó (Mezclador horizontal marca GFL 3018) por 30 minutos a 245 rpm. Se filtró la muestra y se agregó 60 ml de acetato de amonio ( $C_2H_7NO_2$ ). Al filtrado resultante se lo reservó para leer las bases intercambiables (calcio, magnesio y sodio).

El relave que quedó en el filtro fue lavado con 50 ml de etanol ( $C_2H_6O$ ), al filtrado de este se lo desechó, mientras que al relave se lo volvió a filtrar con 100 ml de cloruro de potasio (KCl) 1N. Se colocó en un balón Kjeldahl 20 ml del último filtrado y 3ml de hidróxido de sodio 10N (NaOH) (marca Emsure) y se lo destiló por 5 minutos. Esto se recogió en un vaso que contenía 2 ml de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) (marca Fisher Chemical) y 20 ul de indicador mixto (rojo de metilo marca Thermo scientific y verde de bromocresol marca Loba Chemie).

El resultado de la destilación se tituló con ácido sulfúrico 0.02 N ( $H_2SO_4$ ) (marca SRL) hasta el cambio de color. Se calculó el CIC reemplazando la siguiente ecuación:

$$CIC \frac{meq}{100g} = N * G * \frac{V}{A} * \frac{100}{Wt} \quad Ec 3$$

*Donde:*

*N: Normalidad del ácido*

*G: Volumen del ácido sulfúrico en la titulación*

*V: Volumen de extracción del equipo*

*A: Volumen de alícuota de la solución de KCl*

*Wt: Peso del relave*

### **2.2.5 Metales**

Se determinó mediante el método EPA 3052. Se pesó 0.5 g de relave en tubos de digestión, se añadió 9 ml de ácido nítrico ( $HNO_3$ ) (marca Ensure) y 3 ml de ácido fluorhídrico (HF) (marca Honeywell), se dejó reaccionar por 15 min. Se cerraron los tubos de digestión y se colocaron en el horno microondas (Mars 6, CEM) previamente programado con el método EPA 3052. Las soluciones fueron filtradas y aforadas a 25ml (Apéndice G). Finalmente, se determinó la cantidad de hierro, cobre, zinc, cadmio y níquel en equipo de absorción atómica (marca Perkin Elmer modelo AAnalyst400).

### 2.2.6 Límites de Atterberg

**A. Límite líquido:** Se determinó mediante la norma AASTHTO T089-96, donde se mezcló 200g de relave con 30ml de agua destilada hasta obtener una masa de consistencia dura, se tomó una cantidad suficiente de mezcla para llenar uniformemente 10mm de altura en la zona de máximo espesor de la base de la casa grande.

Posteriormente, se realizó una ranura vertical en el centro y se realizaron 2 golpes por segundo, hasta lograr que se unan en el fondo de la copa de la casa grande a lo largo de 13mm. Se registró el número de golpes para cerrar la ranura, se tomó la porción de la muestra de acuerdo al protocolo, se la colocó en un recipiente previamente pesado y se pesó la muestra. Se la colocó en la estufa a 105°C por 24 horas y se determinó la humedad de la muestra.

Se calculó el límite líquido aplicando la siguiente ecuación.

$$\text{Límite líquido: } \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} * 100 \quad \text{Ec 4}$$

Donde:

*M1: masa del recipiente y muestra húmeda*

*M2: masa del recipiente y muestra seca*

*M3: masa del recipiente*

**B. Límite plástico:** Se determinó mediante la norma AASTHO T090, se mezcló 20 g de relave con una cantidad de agua destilada hasta lograr una masa plástica. De esta masa se tomó aproximadamente 2g y se realizó una masa elipsoidal.

Siguiendo el protocolo se manipuló la muestra hasta obtener un hilo de diámetro uniforme de 3 o 3.2mm, alcanzado este diámetro se rompió el hilo en 3 fragmentos. Estos se pesaron y depositaron en la estufa a 105°C por 24 horas para determinar el contenido de humedad. Esto se lo realizó por triplicado para el relave filtrado y no filtrado.

Se calculó el límite plástico mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Límite plástico: } \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} * 100 \quad \text{Ec 5}$$

Donde:

*M1: masa del recipiente y muestra húmeda*

*M2: masa del recipiente y muestra seca*

*M3: masa del recipiente*

Obtenidos los valores de límites de Atterberg se calculó el índice de plasticidad mediante la resta del límite líquido y el plástico.

### **2.3 Caracterización de parámetros mecánicos del relave**

Se realizaron probetas cúbicas con dimensiones de 5x5x5cm para los ensayos de compresión simple, mientras que se elaboraron probetas con la dimensión de 16x2x4cm para evaluar los ensayos de resistencia a la flexión, al fuego y a la abrasión.

#### **2.3.1 Ensayo de compresión simple**

Se determinó mediante la norma ASTM C109, se colocó la probeta cúbica dentro del equipo de compresión, Se ejerció una carga uniaxial en la cara horizontal de muestra en el equipo SHIMADZU hasta obtener un esfuerzo Apéndice A).

#### **2.3.2 Ensayo de resistencia a la flexión**

Se determinó mediante la norma ASTM C880, se colocó la probeta rectangular en el equipo con una carga en 3 puntos, 2 en la parte inferior y 1 en centro de la parte superior (Apéndice B), esta última es la que hizo presión a una velocidad constante hasta que el material se rompió. Se determinó la resistencia a la flexión con la ecuación 6.

$$S = \frac{FL}{b} \quad \text{Ec 6}$$

*Donde:*

*S: resistencia a la flexión*

*F: carga de rotura (N)*

*L: espacio entre barras de soporte (mm)*

*b: ancho de la probeta de ensayo (mm)*

#### **2.3.3 Resistencia al fuego**

Se determinó mediante la norma BS EN 13501-2 y consulta bibliográfica, donde se midió el tiempo que tomó la probeta en romperse y el tiempo que tomó en pasar el calor de

un lado de la probeta a otro. Este tiempo determina lo que dura una probeta antes de fallar estructuralmente y con la consulta se otorgó una clasificación basada en la misma norma (Apéndice C).

#### **2.3.4 Resistencia abrasión**

Se determinó la resistencia a la abrasión de manera cualitativa. Se aplicó resistencia con un objeto punzante y no punzante a la probeta, y se determinó el daño en la probeta.

#### **2.4 Mantenimiento de bacteria**

Todos los materiales usados para el mantenimiento fueron esterilizados mediante la autoclave a excepción de la urea esta se esterilizó por filtración con un filtro de 0.45  $\mu\text{m}$ .

La bacteria *Sporosarcina pasteurii*, se replicó diariamente a dos concentraciones de urea (Fisher chemical), al 10% (100 g de urea en 1l de agua destilada) y al 1% (10 g de urea en 1l). En un matraz Erlenmeyer se colocó 5 ml de bacteria, 40 ml de medio (Nutrient Broth marca SRL) y 5 ml de urea (Fisher chemical), se agitó (Agitador Orbi) a 210 rpm por 24 horas en una cámara termostatazada a una temperatura de 28°C, para repetir el proceso.

#### **2.5 Prototipo de fachaletas**

Para la elaboración del prototipo de la fachaleta, previamente se hicieron varias pruebas en función de algunas variables que se mencionan a continuación.

##### **2.5.1 Presión de confinamiento**

Se trabajó en molde de cubico y mediante el uso del límite líquido del relave se determinó el volumen de *Sporosarcina pasteurii* y cloruro de calcio. En función de la densidad (1.85 g/cm<sup>3</sup>), se mezcló 231.25g de relave, 16.5 ml de *Sporosarcina pasteurii* y 16 ml de cloruro de calcio. Se colocó dentro del molde y se aplicó una presión de 2000 psi. Se desmoldó 24 horas después y se dejó curar al aire por 28 días. Finalmente, se inoculó la probeta con bacteria al día siguiente y se alimentó con cloruro de calcio por irrigación cada 8 horas por 5 días, para mejorar la resistencia de esta.

##### **2.5.2 Fluidez**

Se trabajó en molde de cubico con con una fluidez del 30%, es decir, con 30% de humedad respecto al peso. En función de la densidad, se mezcló 331.25 g de relave, 34.7ml

de *Sporosarcina pasteurii* y 34.7ml de cloruro de calcio. La mezcla se colocó en el molde haciendo que se adapte a él por la fluidez que lleva. Se desmoldó a los 5 días y se dejó curar por 20 días. Cuando la probeta perdió la mayor parte de su humedad, se inoculó con bacteria y se alimentó con cloruro de calcio cada 8 horas por 5 días para mejorar su resistencia.

### **2.5.3 Tiempo de curado**

Se realizaron probetas cúbicas (5x5x5cm) en condiciones iguales donde se determinó el parámetro de compresión simple a los 7 días, 14 días y 28 días. Se consideró el mejor tiempo de curado (28 días) al basarse en las probetas con mayor resistencia a la compresión, además, este valor también se emplea en otros estudios como el de Bauzá (2015).

### **2.5.4 Forma de curado**

Se realizaron probetas cúbicas (5x5x5cm) en condiciones iguales ya implementado el tratamiento biológico. Estas probetas fueron sumergidas para el curado, se consideraron 3 distintos medios de curado: agua, nutrient broth (marca SRL) y cloruro de calcio, los dos últimos se los consideró en función a las características de la bacteria. Sin embargo, este tipo de curado no era óptimo ya que las probetas al momento de sumergirse pasado cierta cantidad de tiempo comenzaron a disolverse.

### **2.5.5 Tratamiento biológico fortalecido con cemento**

Se realizaron probetas cúbicas (5x5x5cm) y fachaletas (16x4x2cm) en relación 3:0.5:0.5 de relave, cemento y agua. Donde se pesó 609 g de relave, 101.4 g de cemento y 30 ml de agua, sin embargo, el agua se sustituyó por 15 ml de bacteria y 15 ml de cloruro de calcio. Elaborado el mortero y colocado en los moldes se aplicó una presión de 2000 psi. Se desmoldó después de 24 horas, y se dejó curar al aire por 28 días.

## **2.6 Evaluación del desempeño de los fachaletas producidas a partir de relaves mineros considerando la huella de carbono**

Con el fin de estimar la huella de carbono se emplearon los factores de emisión de la agencia medioambiental británica BEIS, de la base de datos thinkstep con los factores de

emisión de Nueva Zelanda y de la base de datos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

Los insumos que se consideraron para la determinación de la huella de carbono se describen en la Tabla 1, aplicando la ecuación 1.

**Tabla 1**

*Insumos utilizados junto a sus factores de emisión*

<b>Insumo</b>	<b>Factor de emisión</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente</b>
<b>Urea</b>	0,2	kg CO2e/kg	Kim et al. (2017)
<b>Cloruro de calcio</b>	0,43971	kg CO2e/kg	IPCC (2006)
<b>Cemento</b>	0,52	Kg CO2e/kg	IPCC (2006)
<b>Nutri Agar</b>	0,105	kg CO2e/Kg	thinkstep-anz (2022)
<b>Relave</b>	0,00775127	kg CO2e/kg	GOV.UK (2024)
<b>Agua</b>	0,15311	kg CO2/ m3	GOV.UK (2024)
<b>Tierra plástica fina</b>	0,00775127	kg CO2e/kg	GOV.UK (2024)
<b>Arcilla roja</b>	0,00775127	kg CO2e/kg	GOV.UK (2024)
<b>Arcilla arenosa</b>	0,00775127	Kg CO2e/kg	GOV.UK (2024)
<b>Tierra plástica arenosa</b>	0,00775127	kg CO2e/Kg	GOV.UK (2024)
<b>Ventilador</b>	0,5076	kg CO2e/kWh	Ministerio de Energía y Minas (2022)
<b>Horno</b>	0,403	kg CO2/ kWh	Ministerio de Energía y Minas (2022)

## Capítulo tres

### Resultados

A continuación, se muestra los resultados de todos los parámetros considerando que se realizaron por triplicado y duplicado analítico. Así mismo se usó la nomenclatura de RF para relave filtrado y RNF para relave no filtrado.

#### 3.1 Caracterización fisicoquímica

##### 3.1.1 *Potencial de hidrógeno (pH)*

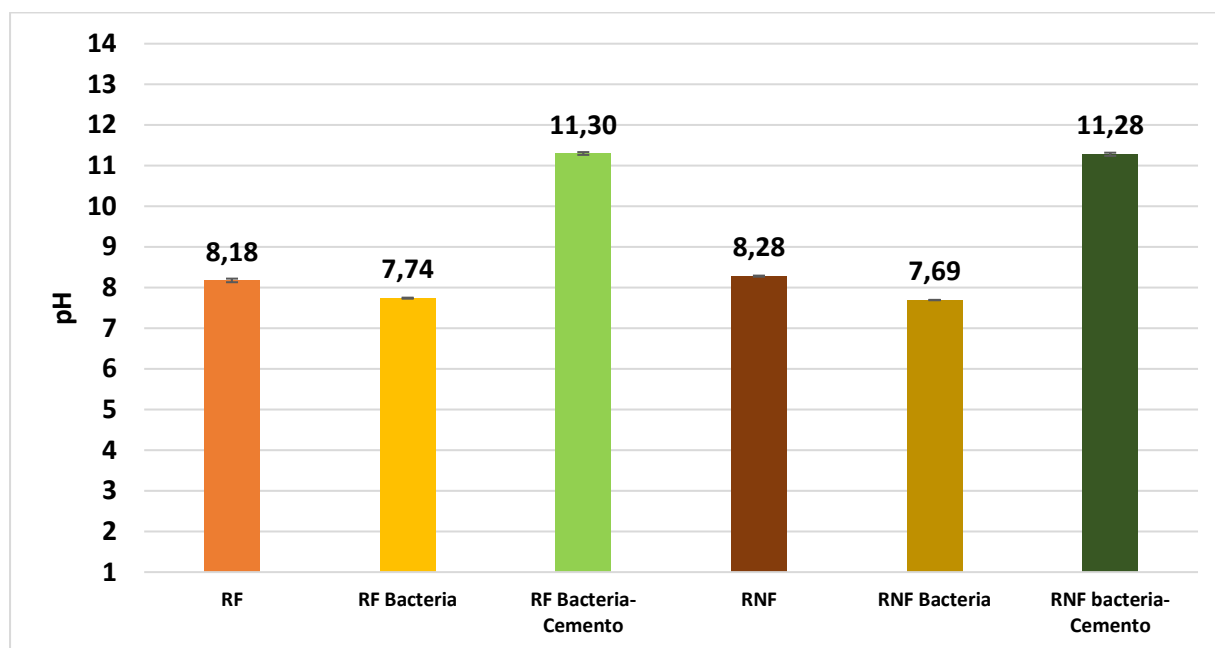
El pH obtenido del RF y RNF es de 8.18 y 8.28 respectivamente, después de aplicar la bacteria en el tratamiento biológico, el pH de ambos relaves bajó a 7.74 en RF y 7.69 en RNF, al aplicar el tratamiento de combinado (bacteria-cemento) el pH subió a 11.30 en RF y 11.29 en RNF.

En las muestras de RF y RNF con bacteria este pH se debe a la presencia de significativa de sales de sodio y calcio (Figura 8), y se comporta como un suelo salino-sódico y cuenta con todas las características mencionadas por Sparks (2003) un pH, menor a 8.5, una conductividad mayor a 4 ms/cm (Figura 3) y un PSI (Porcentaje de sodio intercambiable) mayor a 15 (Apéndice H).

El aumento de pH en las muestras de RF y RNF del tratamiento combinado (bacteria-cemento) se debe a la presencia de óxido portlandita y de metales alcalinos presentes en el cemento, los cuales como su nombre indica al ser alcalinos incrementan el pH (Yousuf et al., 2024), así mismo, el pH de 11.29 corresponde a suelos que contienen excesos de sales de calcio (USDA, 1999) y como menciona Soriano (2018b) si la muestra está saturada de cationes de calcio o magnesio será de pH alcalino, en este caso es calcio y esto se observa en la Figura 8 donde la cantidad de sales de calcio es muy elevada en comparación al resto de muestras.

Figura 2

Resultados análisis pH



*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=6), RF corresponde a relave filtrado y RNF a relave no filtrado

### 3.1.2 Conductividad eléctrica

Se obtuvo una conductividad eléctrica de 1.88 ms/cm para el RF y 1.67 ms/cm para el RNF (Figura 3), para el tratamiento con la bacteria la conductividad aumentó a 9.4 ms/cm en RF y 9.61 ms/cm en RNF, así mismo, en el tratamiento de bacteria-cemento aumento respecto al testigo a 4.16 ms/cm en RF y 3.90 en RNF.

Según USDA (1999) basado en los resultados el RF y RNF los relaves son de carácter ligeramente salino, los relaves con bacteria son fuertemente salinos y los tratados con bacteria-cemento son moderadamente salinos.

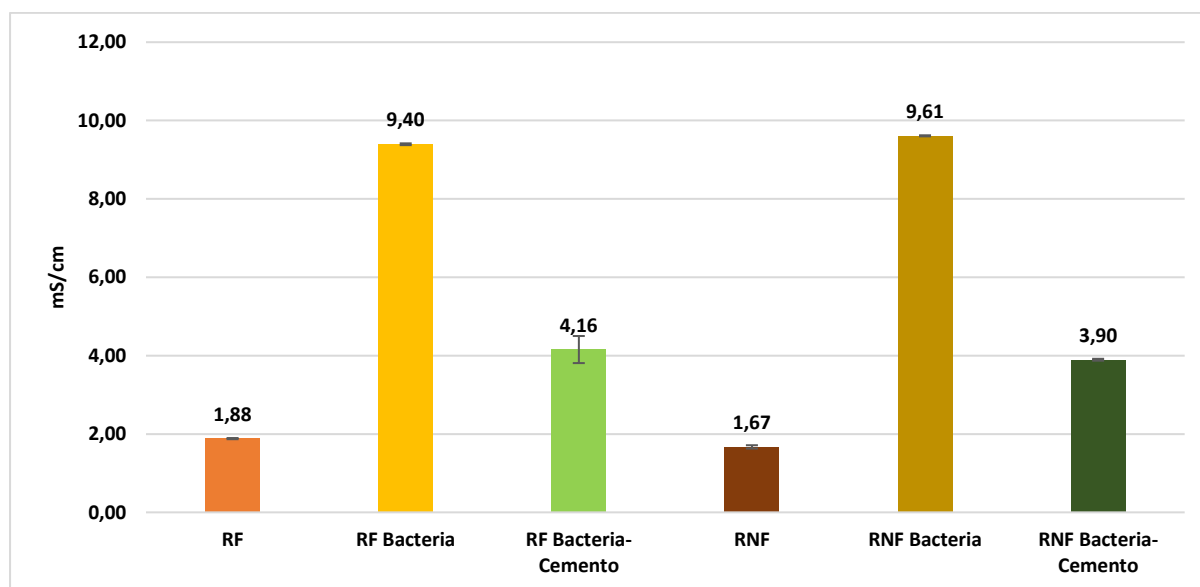
El aumento de la conductividad de las muestras de RF y RNF con bacteria se debe a que este suelo es salino-sódico, Soriano (2018) dice que el suelo es salino cuando predomina el calcio y magnesio, mientras que en el que predomina el sodio el suelo es sódico, en estas muestras como se observa en la Figura 8 existe una presencia significativa de sales de sodio frente a las demás.

Labiser (2020) menciona que este tipo de suelo presenta una alta conductividad (Figura 3), un pH menor a 8.5 como se ve en la Figura 2 y un PSI (Porcentaje de sodio intercambiable) mayor a 15% (Apéndice H) y una RAS (Relación de absorción de sodio) mayor a 13, los dos últimos se basan en la cantidad de bases intercambiables (Figura 8).

Como se observa en la figura 10, la cantidad de sodio en las muestras de RF y RNF con bacteria-cemento baja en comparación a las muestras con bacteria significa que al agregar cemento funciona como una fuente de Ca, y luego este reemplaza las sales de sodio en de los sitios de intercambio (Sparks et al., 2024), lo cual genera que la conductividad eléctrica baje.

### Figura 3

*Resultados análisis de conductividad eléctrica*



*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=6), RF corresponde a relave filtrado y RNF a relave no filtrado

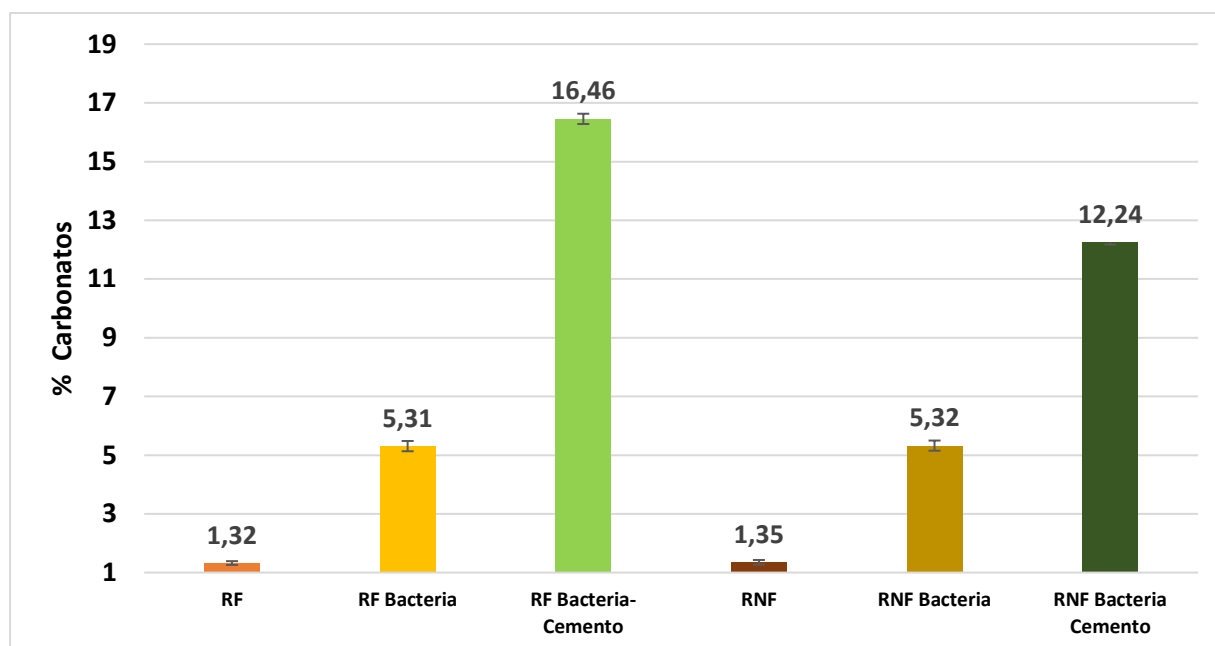
#### 3.1.3 Carbonatos

El RF y RNF presentaron 1.32 % y 1.35% respectivamente de carbonatos, al agregar la bacteria el porcentaje de carbonatos aumentó a valores de 5.31% en RF y 5.32% en RNF, finalmente aumentó de manera significativa a 16.46% en el RF con bacteria-cemento y 12.24% en el RNF con bacteria-cemento

El aumento progresivo de este parámetro se debe al uso de cloruro de calcio y en la elaboración de fachaletas, ya que esto concuerda con lo dicho por F.A.O (2024) sobre el aumento de carbonatos por la presencia de este material.

**Figura 4**

*Resultados análisis carbonatos*



*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=6), RF corresponde a relave filtrado y RNF a relave no filtrado

### 3.1.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (Figura 5) en el RF es de 1.45 meq/100g, mientras que en el RNF es de 2.33 meq/100g. El tratamiento con bacterias el RF presentó una CIC de 4.64 meq/100g y el RNF una CIC de 4.45 meq/100g, mientras que en el tratamiento con bacteria-cemento obtuvo una CIC de 4.39 meq/100g con el RF y 4.64 en el RNF.

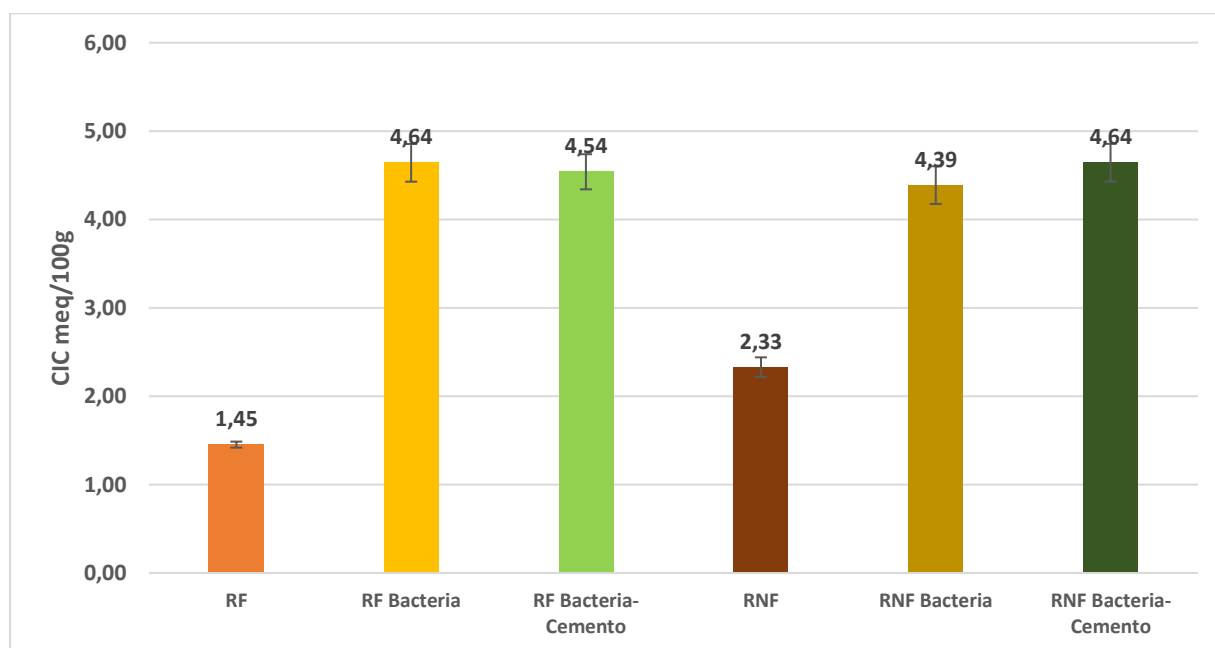
Se evidencia un aumento de CIC en las muestras de RF y RNF con bacteria, que como menciona Soriano (2018a) las arcillas son las que tienen mayor impacto en este parámetro, esto concuerda con el aumento de la cantidad de arcillas (Figura 6) en estas muestras, pasaron de tener 17.5% de arcillas en los relaves originales a 22.5 % en los relaves con bacteria.

Igualmente existe un aumento de CIC en las muestras de RF y RNF de bacteria-cemento. Como menciona FAO (2024a) la CIC está representada por la cantidad de cationes en el suelo (calcio, potasio, sodio, magnesio, etc.), en este caso, principalmente el catión calcio como se observa en la Figura 8, donde las muestras de relave con bacteria-cemento presentan 22009.85 mg/kg de calcio y presentan una CIC de 4.39 meq/100g mientras que las muestras de RF y RNF tienen aproximadamente 57.8 mg/kg de calcio con una CIC de 1.45 meq/100.

Cabe destacar que las muestras con bacteria y bacteria-cemento presentaron una aceptable retención catiónica, dado que las CIC de estas muestras son superiores a 20 meq/100g (Soriano, 2018c).

**Figura 5**

*Resultados análisis de intercambio catiónico*



*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=6), RF corresponde a relave filtrado y RNF a relave no filtrado

### 3.1.5 Límites de Atterberg

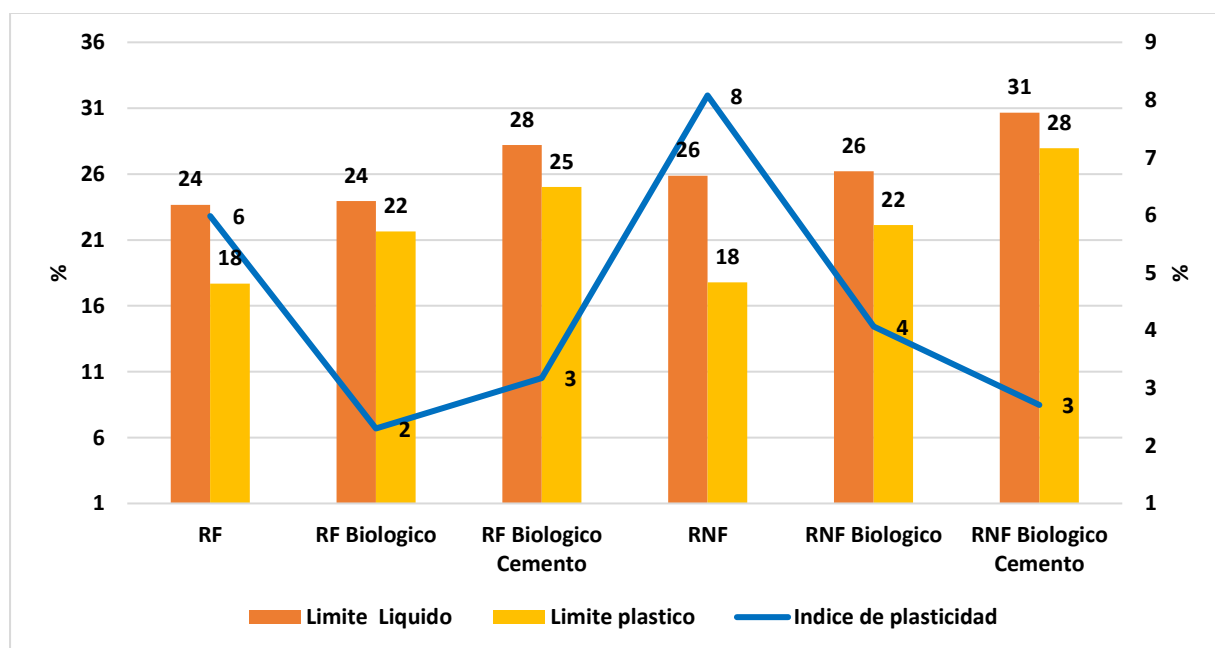
Se determinó que el índice de plasticidad (IP) del RF y RNF es de 5.8% y 8.08% respectivamente (Figura 6), así mismo, el RF con bacteria obtuvo un IP de 2.3% y el RNF con bacteria 4.1%. El IP en el relave filtrado con bacteria-cemento es de 3.2% y en el no filtrado

es de 2.7%. Además, se identificó la clasificación basada en SUCS (Sistema unificado de clasificación), donde, menciona que el RF y RNF son arcilla limo de baja plasticidad y arcilla de baja plasticidad, es decir, que tiene poca capacidad de absorber agua y deformarse (Masferrer, 2019), mientras que las muestras con tratamiento biológico y biológico-cemento se comportan como limos de baja plasticidad que significa presentan una pérdida de cohesión al disminuir su porcentaje de humedad por debajo del límite plástico (Montoya, 2021)

Como indica FAO (2015), los suelos con altos valores de arcillas presentan altos valores de límites líquidos y plásticos, por tanto, son directamente proporcionales. En este estudio el testigo tiene un bajo porcentaje de arcillas (Figura 6), por lo tanto, ambos límites son bajos (Figura 6).

**Figura 6**

*Resultados de los límites de Atterberg*



*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=6), RF corresponde a relave filtrado y RNF a relave no filtrado

**Tabla 2**

*Índice de plasticidad de las muestras*

Muestra	Índice de plasticidad	SUCS
RF	Ligeramente plástico	Arcilla limo de baja plasticidad

RNF	Ligeramente plástico	Arcilla de baja plasticidad
RF Biológico	No plástico	Limo baja plasticidad
RNF Biológico	Ligeramente plástico	Limo baja plasticidad
RF Biológico Cemento	Ligeramente plástico	Limo baja plasticidad
RNF Biológico Cemento	No plástico	Limo baja plasticidad

### 3.1.6 Fluorescencia de Rayos X (FRX)

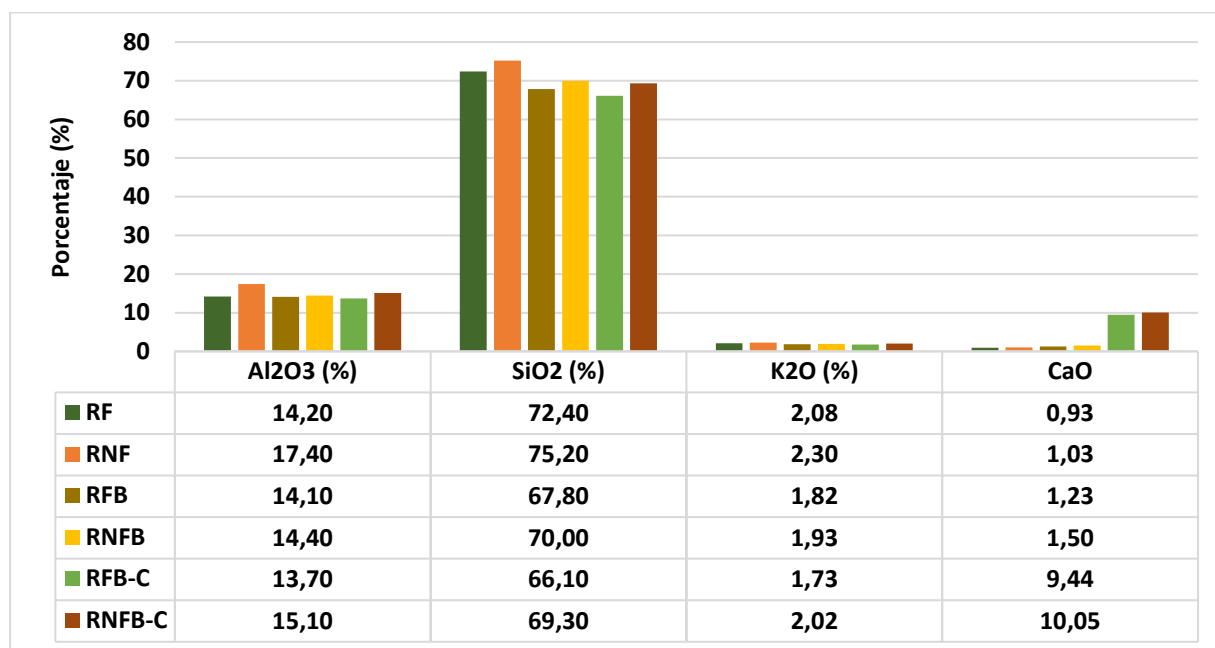
Los resultados de FRX donde se analizaron los compuestos mayoritarios (Figura 7) de todas las muestras de relave indican una presencia significativa de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) y óxido de silicio ( $SiO_2$ ). Este último es un mineral primario que se encuentra en muchas rocas y contribuye de manera importante a la composición del suelo (Scheinost & Singh, 2023).

Así mismo, se observa una variación de óxido de calcio (CaO) en el RF y RNF después del tratamiento con bacteria respecto al testigo incrementando los valores de 0.93% a 1.23% y 103% a 1.50% respectivamente, esto se debe al uso del cloruro de calcio en su elaboración, mientras que el tratamiento combinado (bacteria-cemento) aumento a 9.44% en el RF y 10.05% debido a la suma de cemento al mortero.

El cemento aumentó el óxido de calcio debido a que dentro de sus componentes se encuentran concentrado el óxido de calcio (Palencia, 2023).

Figura 7

Resultados de compuestos mayoritarios de FRX



Nota. RF corresponde a relave filtrado, RNF a relave no filtrado, RFB a relave filtrado biológico, RNFB a relave no filtrado biológico, RFB-C a relave filtrado biológico-cemento y RNFB-C a relave no filtrado biológico cemento.

### 3.1.7 Difracción de Rayos X (DRX)

Dentro del RF y RNF se detectó cuarzo y franklinite, el RF y RNF con bacteria presentaron cuarzo y penguite, y en las muestras de RF y RNF con bacteria-cemento se encontró cuarzo, penguite y carbonato de calcio.

El cuarzo se detectó en todas las muestras ya que corresponde al mineral más simple de sílice, y se encuentra mayoritariamente en la composición de rocas detríticas, félsicas e ígneas intermedias (Mesa et al., 2020) como se observa en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Minerales presentes en los relaves mineros*

Mineral	Fórmula Química
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
Carbonato de calcio	CaCO <sub>3</sub>
Calcita	CaCO <sub>3</sub>

Franklinite	$(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Zn})^{2+}(\text{Fe}, \text{Mn})^{3+}_2\text{O}_4$
Phengite	$\text{K}(\text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

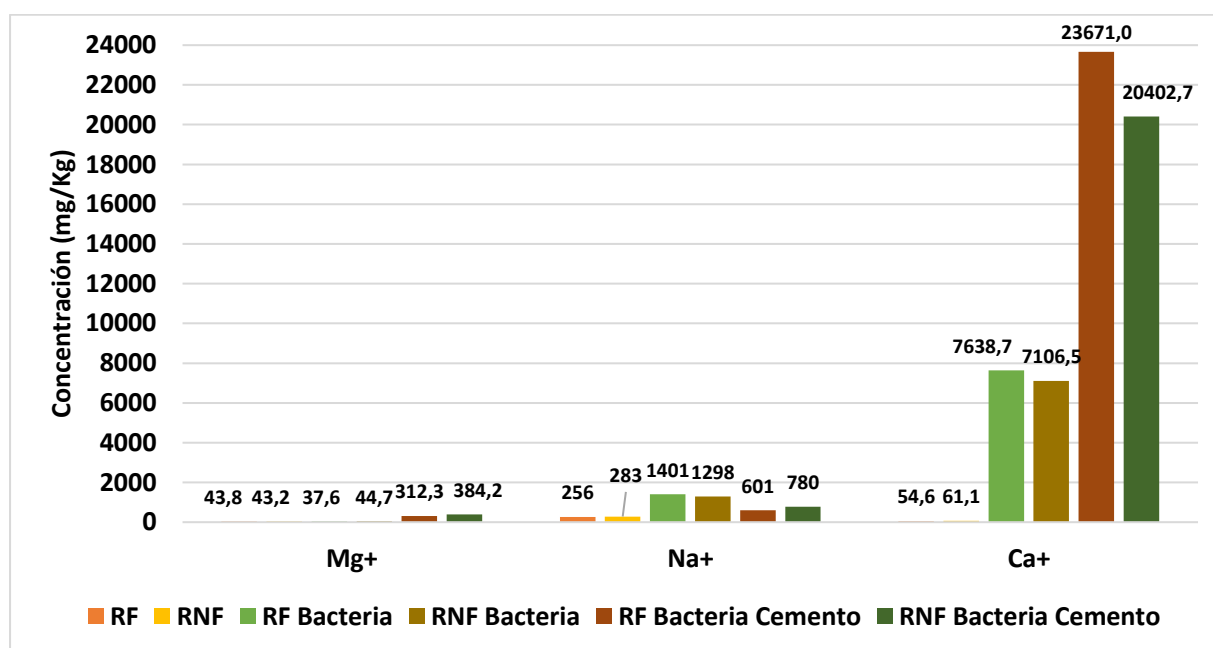
Nota. Los minerales de la tabla son los que se encuentran en los RF, RNF, tratados con bacteria, y tratados con cemento y bacteria

### 3.1.8 Bases

Dentro del RF y RNF se detectó un 43.4 mg/kg de magnesio, 260 mg/kg de sodio y 60 mg/kg calcio, en los relaves con tratamiento biológico se encontró un 40 mg/kg de magnesio, 1300 mg/kg de sodio y 7372 mg/kg de calcio, y las muestras de relave con tratamiento biológico-cemento contiene 348 mg/kg de magnesio, 690 mg/kg de sodio y 22036 mg/kg de calcio.

**Figura 8**

*Resultados de bases intercambiables*



Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=6), RF corresponde a relave filtrado y RNF a relave no filtrado

El aumento de calcio en las muestras con bacteria se debe a uso de carbonato de calcio, mientras que en el tratamiento bacteria-cemento, se suma el cemento que también contiene componentes a base de calcio.

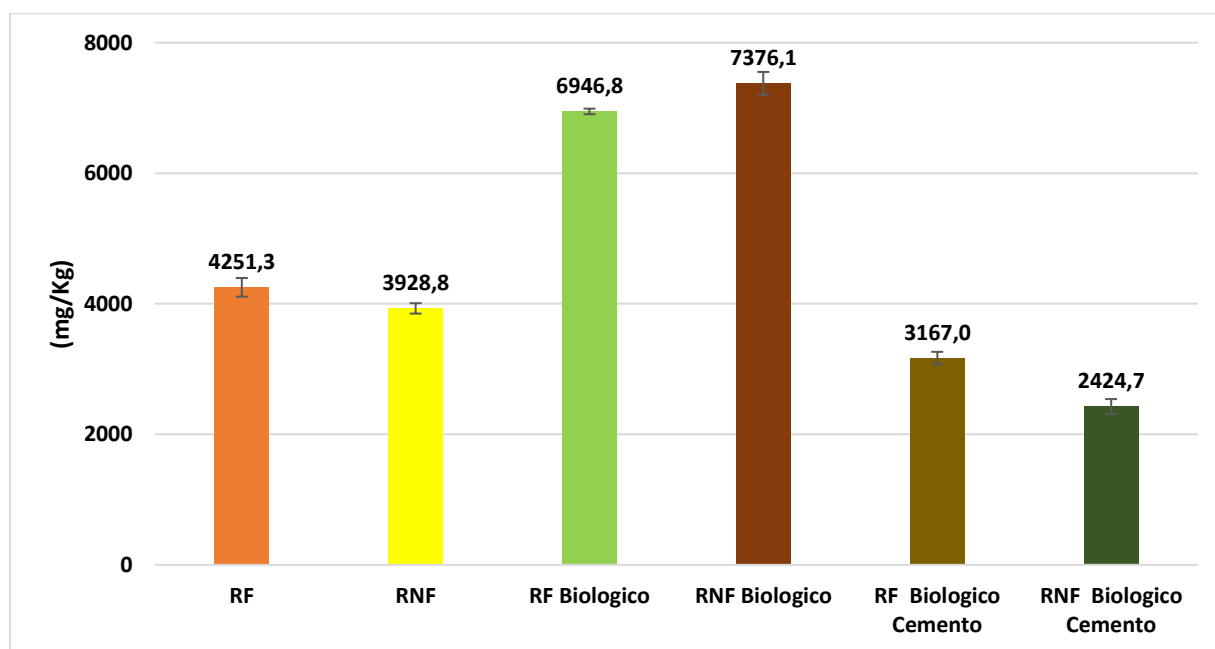
Se ve una reducción de sodio entre las muestras de relave con bacteria y bacteria-cemento esto es causado porque los iones de calcio remplazan los iones de sodio (Sparks et al., 2024), y un efecto de esto es una conductividad baja que se evidencia en la Figura 3.

### 3.1.9 Metales pesados

Se determinó la cantidad de hierro, cobre, níquel, zinc y cadmio en las muestras de relave. El hierro se detectó en promedio 4090.06 mg/kg (Figura 10) en el RF y RNF, 7161.45 mg/kg en el RF y RNF con bacteria, por último, en el RF y RNF con bacteria-cemento se detectó 2795.85 mg/kg.

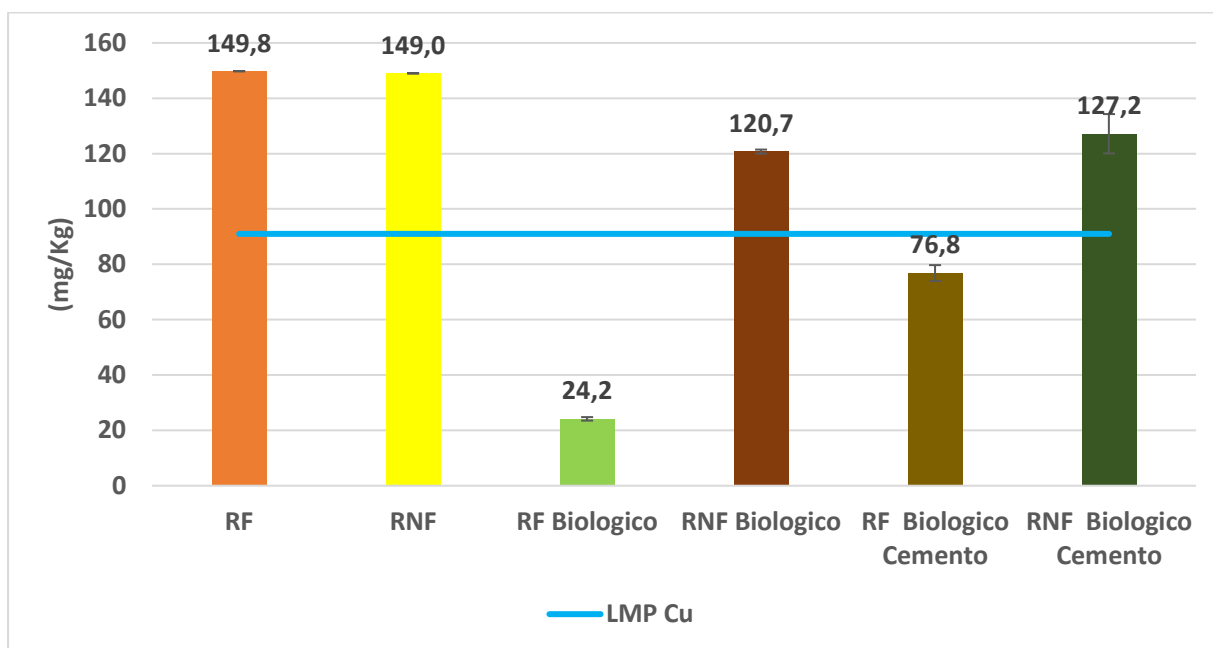
**Figura 9**

*Resultado de hierro*

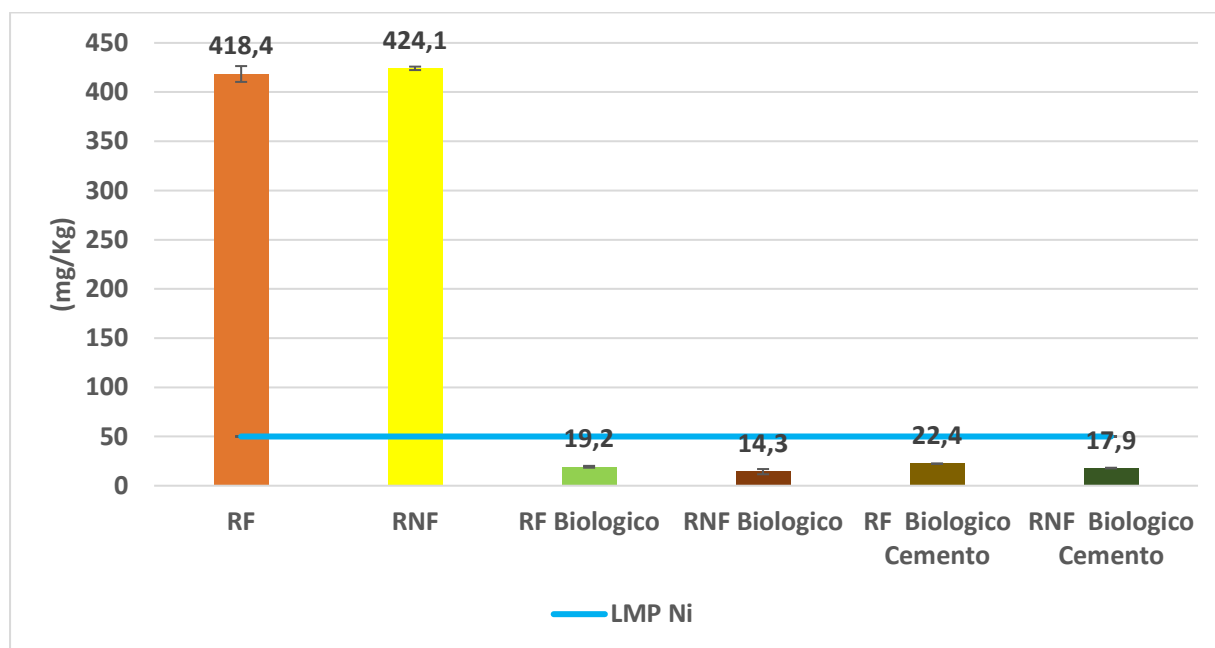


*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=3), RF corresponde a relave filtrado y RNF a relave no filtrado

La presencia de cobre (Figura 10) en el RF es 149.8 mg/kg y en RNF es 149 mg/kg, en el RF con bacteria 24.2 mg/kg, en el RNF con bacteria 120.2 mg/kg, en el RF con bacteria-cemento 76.8mg/kg y en el RNF con bacteria-cemento 127.2 mg/kg.

**Figura 10***Resultado de cobre*

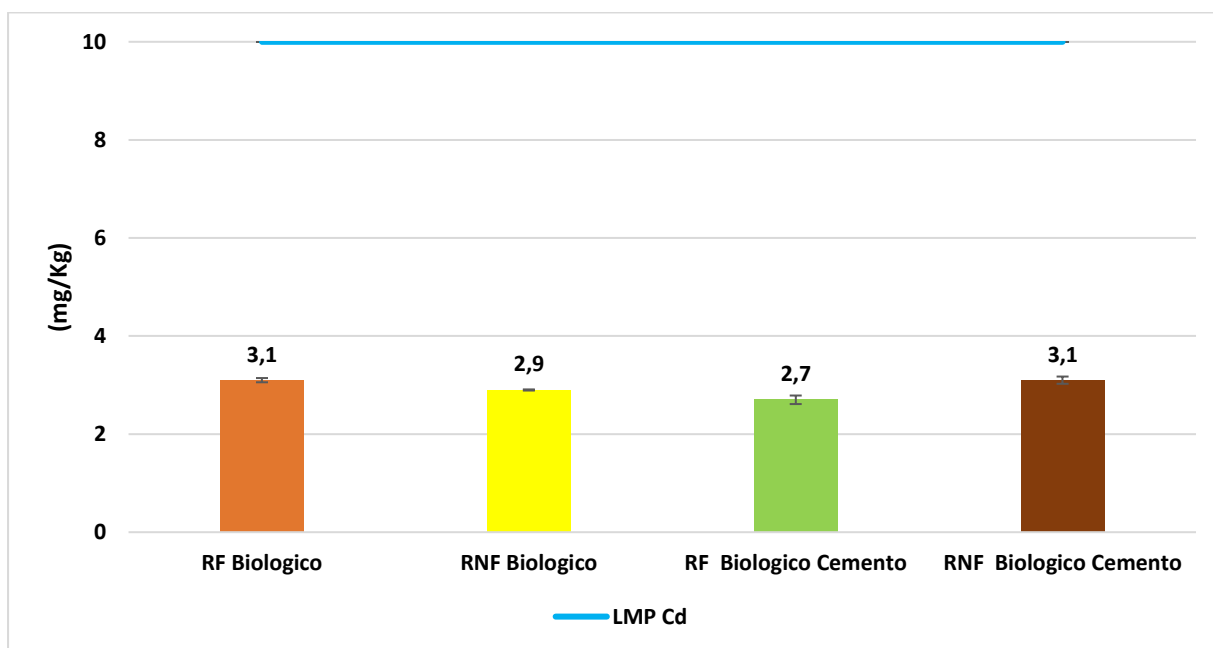
*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE ( $n=3$ ), Límite máximo permisible (LMP) de cobre del acuerdo ministerial 097-2015, Anexo 2, Tabla 2, Suelo remediado de uso industrial.

**Figura 11***Resultado de níquel*

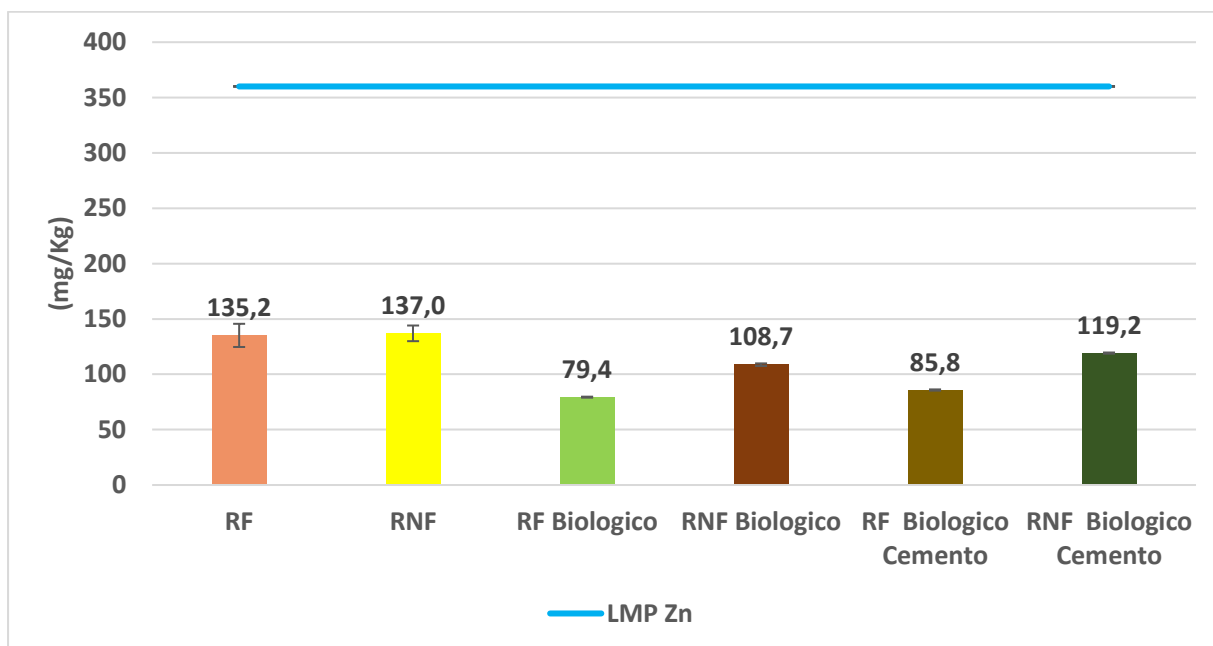
*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE ( $n=3$ ), Límite máximo permisible (LMP) de cobre del acuerdo ministerial 097-2015, Anexo 2, Tabla 2, Suelo remediado de uso industrial.

En la figura 11, se presenta la cantidad de níquel en las muestras, en el RF y RNF es de 418.4 mg/kg y 424.1 mg/kg respectivamente, 19.2 mg/kg en el RF con bacteria, 14.3 mg/kg en RNF con bacteria, 22.4 mg/kg en el RF con bacteria-cemento y 17.9 mg/kg RNF con bacteria-cemento.

En la figura 12 se observa la presencia de cadmio, se detectó 3.1 mg/kg en el RF, 2.9 mg/kg en el RNF, 2.7 mg/kg en el RF con bacteria-cemento y 3.1 mg/kg en el RNF con bacteria-cemento.

**Figura 12***Resultados de cadmio*

*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=3), Límite máximo permisible (LMP) de cobre del acuerdo ministerial 097-2015, Anexo 2, Tabla 2, Suelo remediado de uso industrial.

**Figura 13***Resultados de zinc*

*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=3), Límite

máximo permisible (LMP) de cobre del acuerdo ministerial 097-2015, Anexo 2, Tabla 2, Suelo remediado de uso industrial.

Con el zinc (Figura 13) en el RF y RNF se detectó 135.2 mg/kg y 137 mg/kg respectivamente, en el RF con bacteria 79.8 mg/kg, en el RNF con bacteria 108.7 mg/kg, mientras que, en el RF y RNF con bacteria-cemento fue 85.8 mg/kg y 119.2 mg/kg respectivamente.

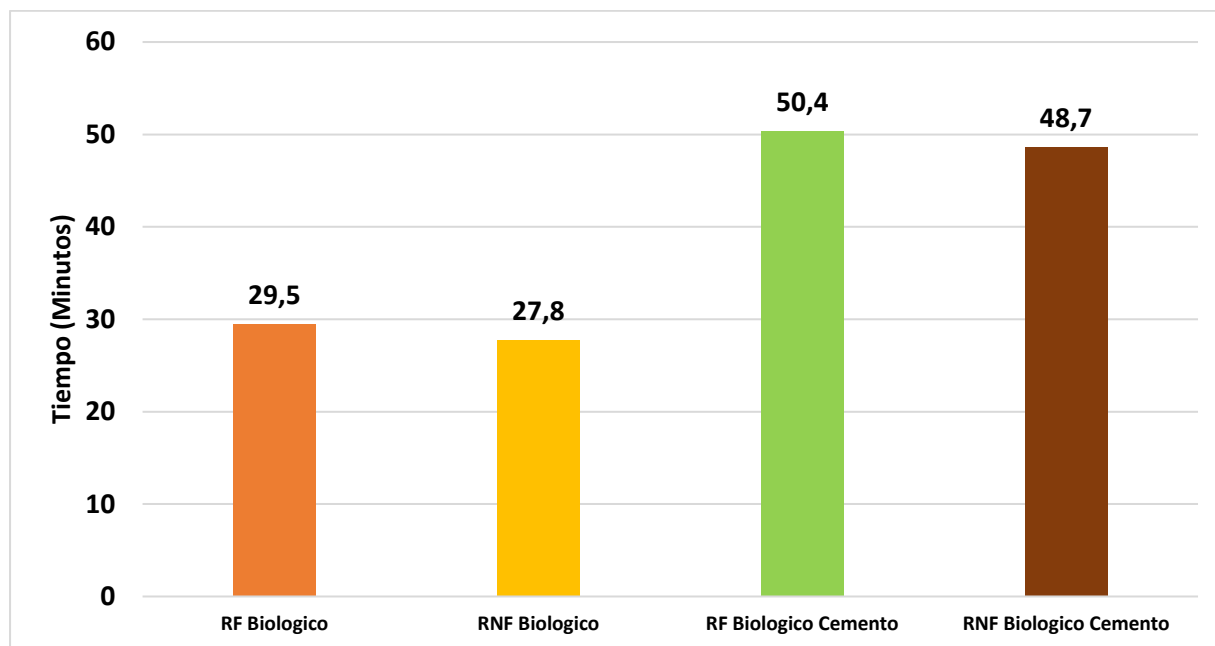
En las figuras 10, 11 y 13 se puede observar la disminución de la concentración de los minerales en los que se aplicó el tratamiento con bacteria y bacteria-cemento, esto se debe a la bacteria *Sporosarcina pasteurii* que es capaz de inducir la precipitación de carbonatos de calcio pero también precipita carbonatos metálicos, por ende es considerado un método de biorremediación ya que inmoviliza o elimina este metal a través de vías enzimáticas (Wilcox et al., 2024).

## **3.2 Caracterización mecánica**

### **3.2.1 Resistencia al fuego**

Se determinó mediante el ensayo de resistencia al fuego (Figura 14), las fachaletas elaboradas con RF y RNF con tratamiento biológico, resistieron 29 minutos y 27 minutos, respectivamente antes de romperse, mientras que las que fueron elaboradas con RF biológico-cemento duraron 50 minutos y RNF biológico-cemento duraron 48 minutos antes de ceder al fuego.

También se determinó el tiempo de integridad de la probeta mediante la norma española BS EN 13501 2 (Tabla 4), el RF y RNF con bacteria presentaron una E20, es decir, resistieron 20 minutos antes de romperse, mientras el RF y RNF con bacteria-cemento tiene una E45, lo que significa resistieron 45 minutos antes de romperse, sin embargo, ninguna probeta cumplió con los requisitos mínimos de radiación de 15 minutos, es decir que pase el calor de un lado a otro de la probeta.

**Figura 14***Resultados de resistencia al fuego*

*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=3), RF corresponde a relave filtrado y RNF a relave no filtrado

**Tabla 4***Análisis de resistencia al fuego*

Muestra	Integridad (E) min	Radiación (W) min
RF Biológico	E20	NA
RNF Biológico	E20	NA
RF Biológico Cemento	E45	NA
RNF Biológico Cemento	E45	NA

*Nota.* Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=3), RF corresponde a relave filtrado, RNF a relave no filtrado, E integridad y NA no aplica.

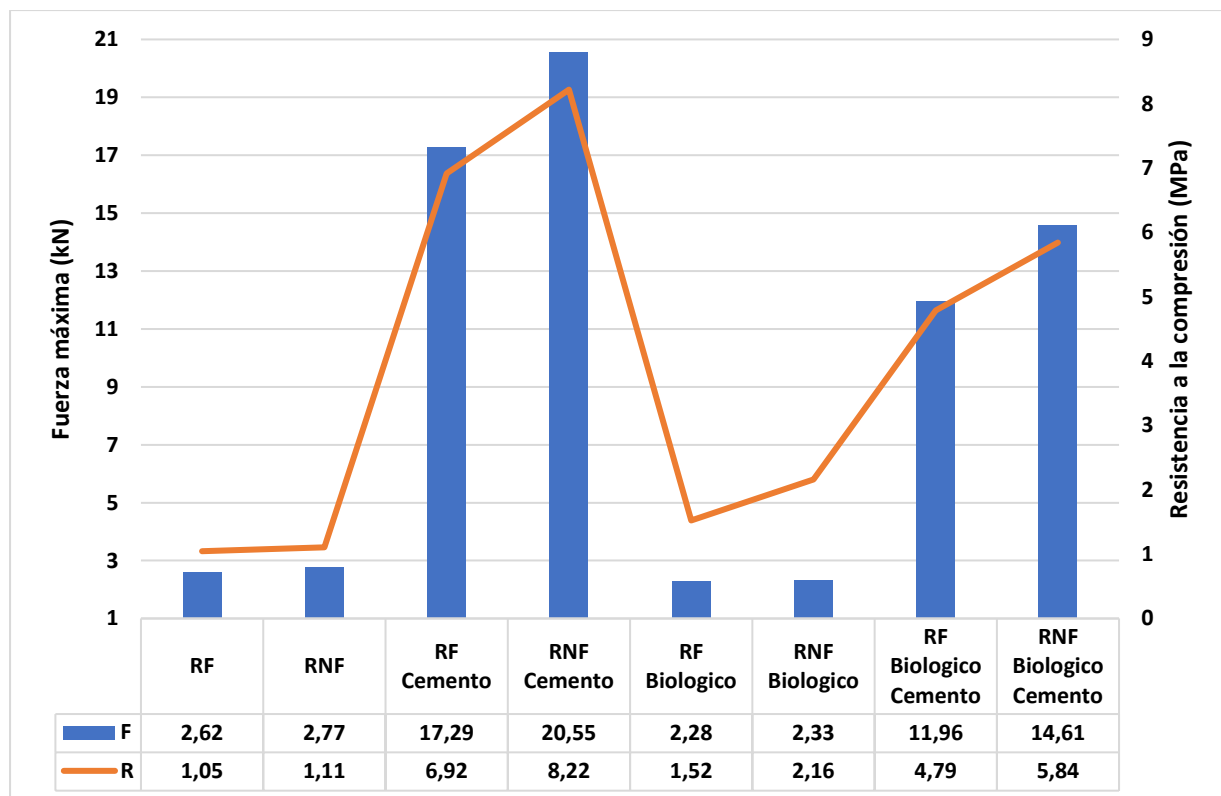
### 3.2.2 Compresión simple

Los RF y el RNF obtuvieron una resistencia de 1.05 MPa y 1.11 MPa respectivamente, al agregar cemento al mortero, aumentó la resistencia en el RF a 6.92 MPa y el RNF 8.22 MPa. En el tratamiento con bacteria la resistencia en comparación a la probeta subió, en el RF a 1.52 MPa y el RNF a 2.16 MPa, y al agregar biológico y cemento, la resistencia aumentó a 4.79 MPa en el RF y 5.88 MPa en el RNF. Como se ve en la figura 15 la resistencia aumentó

considerablemente al agregar cemento a las probetas con biológico, pasó de resistir en el RF 1.05 MPa a 4.79 MPa y en el RNF de 1.11 MPa a 5.84 MPa, así mismo, al compararlo con las probetas que solo tienen cemento presentan una diferencia de 2.25 MPa entre ellas, la cual no se la considera significativa.

**Figura 15**

*Resultados de compresión simple*



*Nota.* En el eje izquierdo se observa la fuerza máxima (kN) y en el eje derecho se ve observa la resistencia a la compresión (MPa). RF corresponde a relave filtrado, RNF a relave no filtrado, F fuerza máxima y R resistencia a la compresión.

Basado en la norma ASTM C27 (Tabla 5), se clasifica el mortero en base a la resistencia en  $\text{kg/cm}^2$ , donde el RNF con bacteria-cemento, RF y RNF con cemento son clasificación N al tener resistencia una resistencia entre  $54 \text{ kg/cm}^2$  y  $125 \text{ kg/cm}^2$ , por lo tanto, este mortero sirve para construir paredes interiores y de división, mientras que el, RF bacteria-cemento es de clasificación O por alcanzar resistencia entre  $25 \text{ kg/cm}^2$  y  $54 \text{ kg/cm}^2$ , y se lo

puede utilizar para paredes no cargadas y paredes de división. Sin embargo, las muestras de RF, RNF, y relave con bacteria no llegaron al valor mínimo de la norma de 25 kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 5**

*Clasificación de morteros según la norma ASTM C270*

<b>Muestras</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Tipo de mortero norma ASTM C270</b>
<b>RF</b>	10,67	NA
<b>RNF</b>	11,28	NA
<b>RF Cemento</b>	83,82	N
<b>RNF Cemento</b>	70,53	N
<b>RF Biológico</b>	15,54	NA
<b>RNF Biológico</b>	22,03	NA
<b>RF Biológico Cemento</b>	48,80	O
<b>RNF Biológico Cemento</b>	59,59	N

*Nota.* RF corresponde a relave filtrado, RNF a relave no filtrado, N a construcción de paredes interiores, O a paredes no cargadas y NA a no aplica.

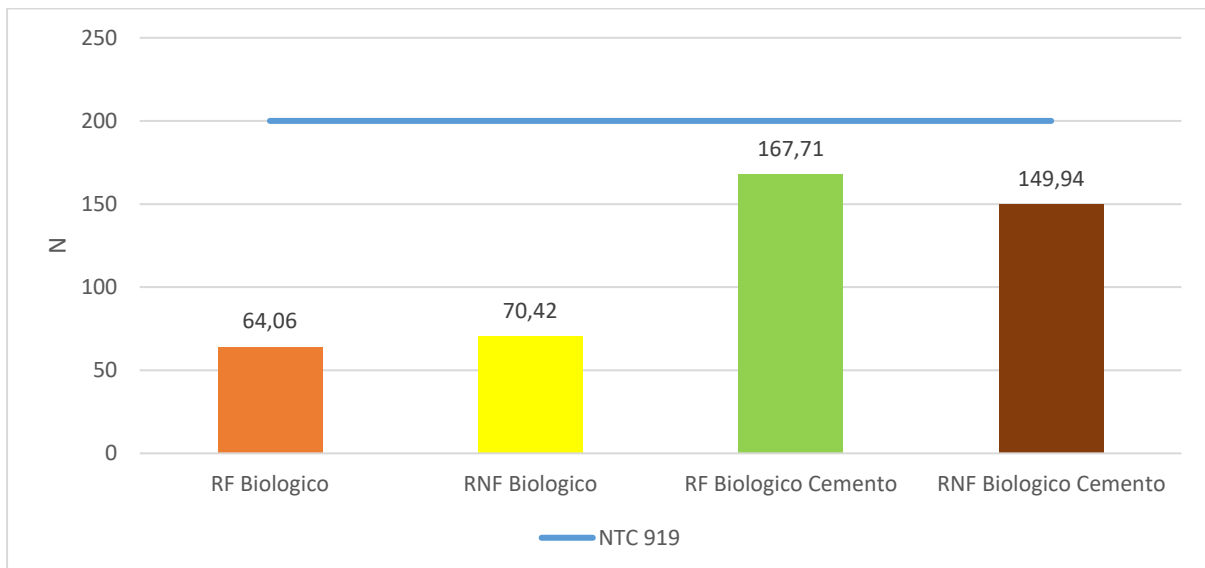
### **3.2.3 Flexión**

Las fachaletas de RF biológico obtuvo una fuerza de 64.06 N mientras que en el RNF biológico 70.42 N de fuerza, la cual aumenta al agregar cemento al mortero donde obtiene una fuerza de 167.71 N en el RF y 149.94 N en el RNF (Figura 16), así mismo, el RF y RNF biológico presentó una resistencia a la flexión de 0.51 N/mm<sup>2</sup> y 0.56 N/mm<sup>2</sup> respectivamente, la cual aumenta al poner cemento a una resistencia a la flexión de 1.34 N/mm<sup>2</sup> en el RF y 1.19 N/mm<sup>2</sup> (Figura 17), por lo tanto, se determinó que al agregar cemento a la mezcla de mortero obtuvo fuerza y resistencia significativa a la flexión.

Sin embargo, la fuerza máxima (Figura16) es inferior a la determinada por la norma colombiana NTC 919 de 200 N, así mismo, la resistencia a la flexión de las probetas de este estudio como se observa en la Figura 17, son menores comparadas con la norma colombiana NTC 919 de 20 MPa y varias marcas de fachaletas convencionales (Terraforte, KLIPEN, MeUP y Arunachalam).

**Figura 16**

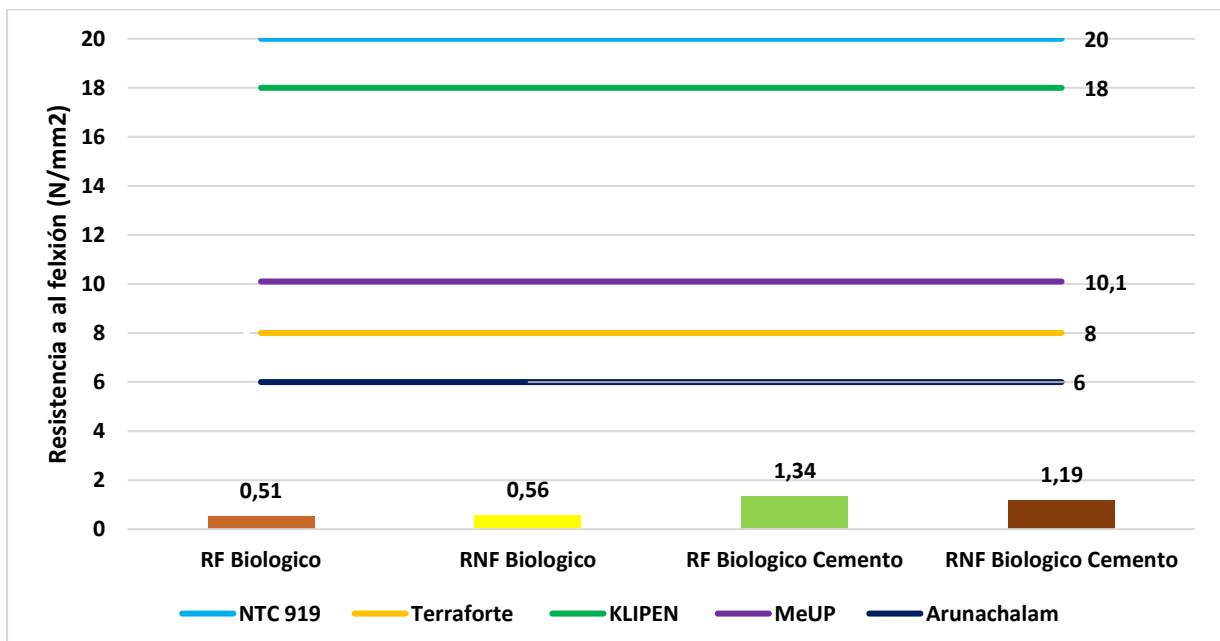
Resultados de la fuerza máxima (N)



Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=3), Valor mínimo fuerza máxima (N) de la norma colombiana NTC 919

**Figura 17**

Resultados resistencia a la flexión



Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios de los triplicados  $\pm$  DE (n=3), Valor mínimo de resistencia a la flexión (N/mm²) de la norma NTC 919. RF corresponde a relave filtrado,

RNF a relave no filtrado, línea color amarilla pertenece a marca Terraforte, línea verde a la marca KLIPEN, línea morada a la marca MeUP y la línea azul al estudio de Arunachalam.

**Tabla 6**

*Resultados de resistencia en fachaletas*

Muestra	Fuerza kN	Resistencia la flexión	Resistencia la flexión
		MPA	Kg/cm <sup>2</sup>
RF Biológico	0,064	0,51	5,21
RNF Biológico	0,070	0,56	5,72
RF Biológico Cemento	0,168	1,34	13,63
RNF Biológico Cemento	0,150	1,19	12,18

### 3.2.4 Abrasión cualitativa

Dentro de la abrasión las fachaletas de RF y RNF que están solo con tratamiento biológico (Tabla 7), demostraron que se comportan débiles frente a la abrasión por un objeto con y sin punta, ya que presentaron una grieta considerablemente profunda, mientras que los que tienen tratamiento biológico y cemento presentaron una alta resistencia a la abrasión ya que con objetos con y sin punta no se produjeron heridas profundas en la fachaletas, solo superficiales, por lo tanto, el uso del cemento aumentó su resistencia a la abrasión.

**Tabla 7**

*Resultados de abrasión cualitativa*

Muestra	Objeto con punta	Objeto sin punta
RF Biológico	Profundo	Profundo
RNF Biológico	Profundo	Profundo
RF Biológico Cemento	superficial	Superficial
RNF Biológico Cemento	Superficial	Superficial

### 3.3 Análisis de huella de carbono

Como se observa en la Tabla 8 se consideraron todos los insumos utilizados en la elaboración de la fachaletas con tratamiento biológico-cemento, y dio como resultado que la huella de carbono es de 0.021 kgCO<sub>2</sub>e, así mismo, en la Tabla 9 se observan los insumos

utilizados para realizar fachaletas comerciales, donde se identificó una huella de carbono de 1.01 kgCO<sub>2</sub>e, esto debido al aumento de insumos y principalmente al uso de horno y ventiladores y en la Tabla 10 se observan los materiales utilizados en las fachaletas con tratamiento biológico, donde obtuvo una huella de carbono de 0.004 kgCO<sub>2</sub>e, la reducción en esta huella se debe a que no se usó cemento en la mezcla de mortero.

**Tabla 8**

*Huella de carbono en 1 fachaleta con tratamiento biológico-cemento*

Insumo	Consumo	Unidad	Factor	Unidad	Emisiones Kg CO <sub>2</sub>
Urea	0,0005	kg	0,2	kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0001
Cloruro de calcio	0,005	kg	0,43971	kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0022
Cemento	0,0338	kg	0,52	Kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0176
Nutri	0,004	kg	0,105	kg CO <sub>2</sub> e/Kg	0,0004
Relave	0,203	Kg	0,00775127	kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0016
<b>Huella de carbono</b>					<b>0,0219</b>

**Tabla 9**

*Huella de carbono de 1 fachaleta comercial*

Insumo	Consumo	Unidad	Factor	Unidad	Emisiones Kg CO <sub>2</sub>
<b>Agua</b>	0,000392	m <sup>3</sup>	0,15311	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	0,0001
<b>Tierra plástica fina</b>	0,352	Kg	0,00775127	kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0027
<b>Arcilla roja</b>	0,528	kg	0,00775127	kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0041
<b>Arcilla arenosa</b>	0,264	kg	0,00775127	kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0020
<b>Tierra plástica arenosa</b>	0,176	kg	0,00775127	kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0014
<b>Ventilador</b>	0,0076	kWh	0,5076	Kg Co <sub>2</sub> /kWh	0,0039
<b>Horno</b>	2,47	KWh	0,403	kg CO <sub>2</sub> /KWh	0,9954
<b>Huella de carbono</b>					<b>1,0096</b>

**Tabla 10**

*Huella de carbono de 1 fachaleta con tratamiento biológico*

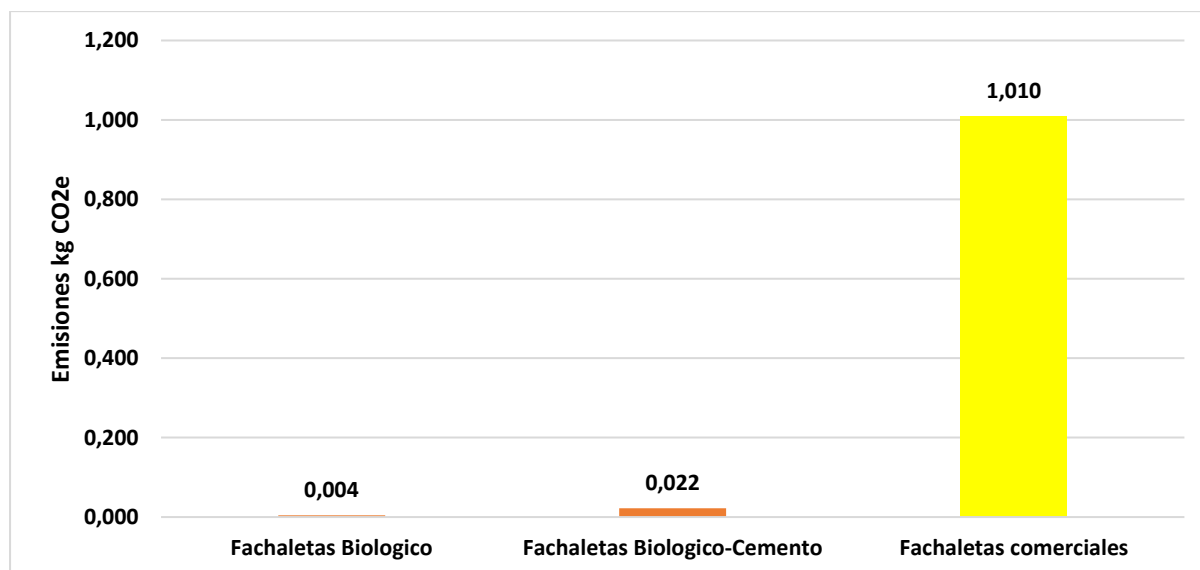
Insumo	Consumo	Unidad	Factor	Unidad	Emisiones Kg CO <sub>2</sub>
Urea	0,0005	kg	0,2	kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0001
Cloruro de calcio	0,005	kg	0,43971	kg CO <sub>2</sub> e/kg	0,0022
Nutri	0,004	kg	0,105	kg CO <sub>2</sub> e/Kg	0,0004

Relave	0,203	Kg	0,00775127	kg CO2e/kg	0,0016
<b>Huella de carbono</b>					0.0043

En la Figura 19, se observa la huella de carbono de la fabricación de una fachaleta prototipada en comparación con una fachaleta comercial.

**Figura 18**

*Comparación de huella de carbono*



### 3.4 Discusión

Con el fin de determinar si los relaves mineros se pueden usar como agregados en material de construcción, se evaluaron las características fisicoquímicas y mecánicas que ofrecen, principalmente la capacidad de que el relave sea químicamente estable sin presentar afectaciones al usuario y

El pH del RF y RNF es de 8.23 cercano a 7.22 presentados por Lalangui & Méndez (2021) y 8.2 por Ceniceros et al. (2018) dentro de su caracterización de relave minero.

Después del primer tratamiento mediante el uso de la bacteria *Sporosarcina pasteurii*, el pH del RF bajó a 7.74 y la del RNF 7.69, estos valores son iguales a 7.8 presentado por Bao et al. (2024) en relaves de plomo y zinc biocementados y a los presentados por Yang et al. (2024) en relaves de plomo y zinc de Bajiazi en Huludao. Es decir, en el proceso de MICP bajo el pH, debido a la presencia considerable de sodio y calcio en sus muestras (Sparks,

2003), esto se dio por cloruro de sodio como compuesto del medio de crecimiento de la bacteria y el cloruro de calcio aplicado como alimento para la misma en este tratamiento.

Mientras que en el segundo tratamiento con la bacteria y el cemento el pH de ambos relaves subió a aproximadamente a 11.30, es decir es un pH alcalino, esto debido al aumento de calcio procedente del cemento, como menciona Osorio (2012) un pH alcalino presenta niveles elevados de calcio y magnesio, así mismo, Ramos & Pérez (2021) y Kuranchie et al. (2015) demuestran que al agregar cemento a al mortero el pH aumenta a valores entre 11 y 12, y esto concuerda con las bases de calcio presentes en estas muestras (Figura 8), las cuales aumentaron significativamente provocando el aumento del pH (Soriano, 2018d).

Dentro de los materiales de construcción se busca que no tengan una alta conductividad eléctrica, debido a los posibles riesgos eléctricos que puede generar una estructura.

La conductividad del RF y el RNF se obtuvo 2.24 ms/cm valores cercanos a los realizados por INGEMMET & BGR (2023) con 2.9 ms/cm de los relaves mineros de La Ciénaga. Al agregar la bacteria la conductividad aumento a 9.36 ms/cm y 9.61 en el RF y RNF respectivamente, esto debido a la presencia de cloruro de calcio en los materiales de elaboración esto lo menciona la empresa American Elements, (2024) donde el cloruro de calcio disuelto en agua aumenta la conductividad eléctrica, así mismo, otro factor a considerar es a la presencia de nitrógeno del medio de crecimiento de la bacteria (urea), ya que como menciona Beltrán et al.(2019) y Blasi et al. (2010) existe una relación positiva entre el nitrógeno y la conductividad eléctrica, es decir, que si aumenta el nitrógeno aumenta la conductividad y viceversa. Mientras que en el tratamiento combinado de bacteria-cemento la conductividad es de 4 ms/cm en comparación al relave con bacteria, esto se debe a que los cationes de calcio remplazaron a los de sodio (Sparks et al., 2024) generando una baja conductividad, esto se lo puede apreciar en la figura 8.

Dentro de las bases intercambiables se identificó el aumento de calcio, en las muestras con bacteria y bacteria-cemento (Figura 8), esto se ve representado el análisis de carbonatos, donde las fachaletas con bacteria aumento en el porcentaje de carbonatos de

1.33 % a 5.31 %, debido al uso de cloruro de calcio como alimento para la bacteria. Así mismo existió un alto nivel de carbonatos para el tratamiento de bacteria-cemento donde paso de 1.33% a 12.4 %, y como se mencionó anteriormente se ve reflejado en la cantidad de calcio de estas muestras (Figura 8), esto fue debido esto fue el cemento el cual contiene carbonato de calcio en su composición por ente este parámetro aumenta (I.E.C.A, 2024).

Además, los relaves comunes presentan bajas cantidad de carbonatos de calcio, esto ve demostrado en el estudio de Lam et al. (2020) con 3.5% en su estudio de relaves de minas de cobre y en presente estudio con 1.3% (Figura 4).

La capacidad de intercambio catiónico del RF es de 1.45 meq/100g (Figura 5) lo cual es una valor menor a los análisis hechos por Mapinduzi et al. (2016) en minas de oro con 7.48 meq/100g, mientras, que el RNF presento una capacidad de intercambio catiónico de 2.33 meq/100g, así mismo, el tratamiento con bacteria y bacteria-cemento el CIC de ambos relaves aumento a valores mayores a 4 meq/100g. En el primer tratamiento se debe al aumento de arcilla dentro de estas muestras (UCM, 2024)(Apéndice I), ya que paso de 17.5% a 22.5% de arcillas en estas muestras, y en el tratamiento bacteria-cemento, aumento debido a la saturación de sales de calcio presentes en las muestras, ya que esta base también representa la CIC (FAO, 2024a).

Así mismo, se realizó la identificación de textura, el RF y RNF presentaron una textura franco limosa, la cual concuerda con la caracterización de AW et al. (2021) en relaves de minas de oro. Mientras que el RF con biológico y cemento, se comportó como un suelo franco arenosa la cual es igual a la presentada por Oliveira et al. (2017) en su relave mejorado con cemento, se evidencia una reducción significativa del porcentaje de limos esto debido al uso del calcio el cual funciona como aglutinante de partículas, generando partículas del tipo arena, lo cual se ve reflejado en el porcentaje de arena (Apéndice I)de las muestras con tratamientos (Pulickal et al., 2021).

Se determinó que el RF y RNF son ligeramente plásticos (Tabla 2), estos son iguales a los determinados por Hu et al. (2016) en relaves de hierro de Yuhezhai y relaves de cobre

de Bahuerachi, así mismo, el RNF tiene la misma clasificación SUCS de Qiu & Segó (2000) de arcilla de baja plasticidad.

Las muestras donde se utilizó bacteria y cemento, el RF es ligeramente plástico y en el RNF es no plástico (Tabla 2), estos valores son iguales a los obtenidos por Oliveira et al. (2017) en relaves de hierro mejoradas con cemento Portland, así mismo, ambos son considerados limos de baja plasticidad por sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)(F.A.O, 2024).

Dentro de su caracterización mineralógica de compuestos mayoritarios el RF y RNF presentaron valores similares a los dados por Enríquez et al. (2022) en su caracterización de relaves de la concesión minera Campanilla, con una presencia de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) de 58.47% y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en 9.4%, así mismo, Mapinduzi et al.(2016) en relaves de las minas de oro de Geita y Bulyanhulu indica valores de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) de 50.74% y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en un 14.6%, de la misma, el valor del óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) es similar al presentado por Carmignano et al. (2021) con 1.47% en relaves de hierro de Liaoning, China y Joda-Badbil, India y los valores de óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) son iguales a los presentados por Lalangui & Méndez (2021) en relave del sector "Campanillas con un 1.91%.

Mientras que en los compuestos minoritarios, Peña & Menendez (2016) en la caracterización de relaves procedentes de la minera Ponce Enriquez obtuvo 0.06% de zinc y plomo 0.03 %, los cuales son mayores a los obtenidos en este estudio con 0.01% y 0.006% para zinc y plomo respectivamente, así mismo, para manganeso Ramirez (2020) obtuvo 0.19% en su caracterización de relave de cobre del proyecto Minero El Roble, los cuales están dentro de los datos obtenidos en este estudio (Figura 9) 0.2% de este compuesto.

En todas las muestras se detectó cuarzo lo cual concuerda con la identificación DRX realizada por Enríquez et al. (2022) y Lalangui & Méndez (2021) donde existió presencia de cuarzo en sus relaves respectivos ya que es el mineral que más se encuentra en la corteza terrestre (Mesa et al., 2020), también se detectó fengita, la cual pertenece al grupo de las micas moscovitas, se encuentra en rocas ígneas o metamórficas por lo que se encuentra con abundancia en la corteza terrestre (Minerals&Fillers, 2023), esto también lo corrobora Lemos

et al. (2020) y Lam et al. (2020) con los análisis realizados por en minas de oro y cobre respectivamente, donde detectaron este mineral.

En los relaves utilizando cemento se detectó calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) debido a los compuestos del cemento y del cloruro de calcio usado.

En el parámetro de metales se los datos se compararon con la normativa ambiental, el acuerdo ministerial 097, anexo 2, tabla 2 de suelo industrial, donde se determinó que los niveles de cobre del RF, RNF, RNF biológico y RNF biológico-cemento superan el límite máximo permisible de 91mg/kg (Figura 10), así mismo, el níquel en la muestra de RF y RNF superan el límite permisible de 50 (Figura 11).

Mientras que en las mediciones de cadmio y zinc (Figura 14 y Figura 15), ninguna muestra supera el límite máximo permisible de 10 mg/kg y 360 mg/kg respectivamente.

Además, como se observa en la Figura 9 en todas las muestras se detectó una cantidad significativa de hierro, esto se debe a los moldes que se utilizaron, ya que hasta el momento de desmoldar el molde presentaba óxido que se impregnaba en las probetas.

Cordero et al. (2022) en su caracterización de relave de Andacollo, obtuvo 3 mg/kg de cadmio, 505 mg/kg de zinc, 66 mg/kg de cobre, 20 mg/kg de níquel, el primero es igual al que se obtuvo en este estudio con 3 mg/kg, sin embargo, los valores de zinc son menores con 132.9 mg/kg y los valores que se obtuvieron de cobre y níquel son superiores con 150 mg/kg y 418.4 mg/kg respectivamente a los presentados por este autor, un factor a tomar en cuenta es la ubicación y composición del suelo.

Con el fin de compararlo con materiales convencionales se realizaron los análisis mecánicos de compresión simple, resistencia a flexión, resistencia a la ignición, resistencia a la abrasión cualitativa, así mismo, un parámetro importante es el cálculo de la huella de carbono, para verificar si este procedimiento de fabricación es mejor para el medio ambiente que el proceso tradicional.

En el parámetro de resistencia a la ignición (Tabla 4) se tomó en cuenta la norma española BS EN 13501-2: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego, las fachaletas de ambos relaves con biológico referente a la parte de integridad

obtuvieron una integridad de E20, mientras, las que fueron con relave, biológico y cemento consiguieron una integridad de E45, es decir, que la probeta cede ante el fuego estructuralmente en 20 min para el caso de RF y RNF con bacteria y 45 min para las fachaletas de RF y RNF con bacteria-cemento. Sin embargo, en el ámbito de radiación todas las probetas no soportaron los valores mínimos determinados por esta norma.

Y basados en la clasificación de la norma anterior, el RF y RNF biológico, el RF y RNF biológico-cemento son de categoría A1, es decir, es un material no combustible (Wakelin, 2024), que no contribuyen en alto grado al fuego y que en ninguna fase del mismo pueden favorecer al mismo (TEXfire, 2024), esta clasificación se la considero por lo componentes de las fachaletas, ya que, el relave al ser un sólido molido, procedente de la roca del yacimiento donde se explota (SERNAGEOMIN, 2024), y como menciona Cupa Stone (2019) la piedra es considera un material ignifugo de clasificación A1, así mismo, el cemento por su estructura mineralógica con presencia de silicatos y aluminatos de calcio ayudan a aumentar su resistencia al fuego (BECOSAN, 2020).TEXfire (2024)

Para el parámetro de compresión simple las pruebas fueron realizadas a los 28 días, los relaves con el tratamiento biológico obtuvieron una resistencia de 1.52 MPa en RF y 2.16 MPa en RNF, estos valores son superiores a los desarrollados por Yang et al. (2024) donde obtuvo 0.2 MPa de resistencia en relaves biocementados con *Sporosarcina pasteurii* . Mientras que con el tratamiento biológico-cemento el RF se obtuvo una fuerza máxima de 11.96 kN con una resistencia de 4.79 MPa, mientras, que el RNF obtuvo una fuerza máxima de 14.61 kN junto con una resistencia de 5.84 MPa, estos valores son muy inferiores a los realizados por Lojano & Robles (2022) con relaves de cobre donde obtuvieron 43.47 kN de fuerza de y 17.74 MPa de resistencia, así mismo, los análisis de Baziz et al.(2023) demostraron una resistencia de 19 MPa en relaves de oro, el principal factor de esta diferencia es el método de curado ya que Lojano & Robles (2022) curaron sus muestra en agua, mientras, que se usó curado al aire.

Basados en la resistencia a la compresión el mortero realizado se clasifico según la norma ASTM C-270, las muestras de RF, RNF, RF biológico y RNF biológico no entran en

los requisitos de resistencia a la compresión dados por la norma, mientras que el RF cemento, RNF cemento y RNF biológico-cemento llegaron a la clasificación N, es decir, para construcción de paredes interiores y de división, y el RF biológico-cemento es clasificación O, y sirve para utilizar para paredes no cargadas y paredes de división.

Con el fin de comparar las fachaletas realizadas se realizó el ensayo de resistencia a la flexión y fuerza máxima, donde Saldías et al. (2022) en sus probetas de cemento y relave de cobre, presento una resistencia mayor a la obtenida en este estudio, ya que el obtuvo una resistencia de  $31 \text{ kg/cm}^2$ , y el estudio  $12.65 \text{ kg/cm}^2$  (Tabla 6), sin embargo, al compararlo con las probetas de Garrido (2019) tienen valores muy bajos, el obtuvo 23 kN de fuerza máxima mientras que en el estudio se obtuvo 0.159 kN de fuerza máxima, estos valores presentan una diferencia significativa debido a varios factores a tomar en cuenta entre los principales están el método de curado y el tamaño de las vigas, ya que ambos autores curaron sus probetas en agua y sus vigas eran de  $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}$ .

Los valores de resistencia a la flexión en MPa (Tabla 6), para el relave con tratamiento biológico presento un valor de resistencia 0.53 MPa y los que tenían tratamiento biológico y cemento presento una resistencia de 1.23 MPa estos valores son menores a: 8 MPa obtenidos por Zapata (2013) en fachaletas producidas por la empresa Terraforte, 18.8 MPa presentados por la empresa KLIPEN, 10.1 MPa dados por la empresa MeUp y a 6 MPa obtenidos por Arunachalam et al. (2023) en ensayos de flexión con relaves cementados de minas de cobre.

Al compararlo con la norma NTC 919, sobre la fuerza máxima (Figura 16) y la resistencia a la flexión (Figura 17), en el primero el RF biológico, RNF biológico, RF biológico-cemento y el RNF biológico-cemento, no cumplen con los valores mínimos que presenta la norma de 200 N, así mismo, en la resistencia a la flexión, todas las muestras analizadas no superan el límite mínimo de la norma de  $20 \text{ N/mm}^2$ .

Dentro de la abrasión, las fachaletas que están con tratamiento biológico resultaron, ser más débiles que las realizadas con el tratamiento biológico-cemento, debido a que este último brinda a las fachaletas resistencia estructural.

Las fachaletas a base de relave (Figura 20), en el tratamiento biológico-cemento y tratamiento biológico obtuvieron una menor huella de carbono con 0.02 kgCO<sub>2</sub>e y 0.004 kgCO<sub>2</sub>e respectivamente, que las que desarrolla Alvear & Palomeque (2017) en su estudio de huella de carbono con 1.01 kgCO<sub>2</sub>e, por ende la producción de fachaletas a base de relave con biocementación con MICP y MICP-cemento son mejor ecológicamente al tener una baja huella de carbono

## Conclusiones

Se considera que el calcio, es un factor importante en los parámetros físicos y químicos, ya que el aumento de este por el proceso de MICP altera parámetros como son el pH, conductividad, capacidad de intercambio catiónico y textura.

El presente estudio demuestra que el uso de *Sporosarcina pasteurii* como biocementante mejoró la estructura del relave filtrado como no filtrado, este último presentando mejores resultados en los parámetros mecánicos, en compresión simple las probetas de relave no filtrado con tratamiento de bacteria presentan resistencia de 2.16 MPa, siendo mayor a la probeta control de relave no filtrado con 1.11 MPa y a probetas elaboradas mediante esta técnica presentaron resistencias de 0.2 MPa.

En las pruebas de resistencia a la flexión, las fachaletas a base de relave filtrado con tratamiento de bacteria-cemento fueron las que presentaron una resistencia a la flexión más alta con 1.34 MPa. Este valor frente a las fachaletas comerciales y a la norma colombiana NTC 919 son valores muy bajos, ya que el valor mínimo de las fachaletas comerciales es de 6 MPa y de la norma 20 MPa.

La huella de carbono de las fachaletas elaboradas con relave con tratamiento biológico-cemento (0.02 kgCO<sub>2e</sub>) y tratamiento biológico (0.004 kgCO<sub>2e</sub>) presentan un valor muy bajo respecto a las fachaletas convencionales (1.01 kgCO<sub>2e</sub>), por lo tanto, si se reaprovecha los relaves como material de construcción mediante la biocementación con MICP se reduce considerablemente la huella de carbono.

### **Recomendaciones**

Se recomienda utilizar moldes de bronce con el fin de evitar procesos de oxidación que pueden ocasionar concentraciones elevadas de hierro en los análisis.

Se recomienda, utilizar diferentes dosificaciones de cemento, así mismo la posibilidad de agregar material grueso y fino para poder obtener mayores resistencias.

Las probetas que fueron realizadas con cemento, se las recomienda curar en agua ya que esto les confiere más resistencia, así mismo, probar diferentes tipos de curado en estas muestras como cloruro de calcio, nutrient broth, agua.

## Referencias

- Acosta, M. (2021, julio 8). *Relave minero como alternativa de reciclaje para la industria de la construcción*. Petroenergía. <https://www.petroenergia.info/post/relave-minero-como-alternativa-de-reciclaje-para-la-industria-de-la-construcción>
- Acuña, S., Jiménez, M., Zambrano, J., & Sarmiento, H. (2018). Soil bacteria that precipitate calcium carbonate: Mechanism and applications of the process. *Acta Agronómica*, 67(2), Article 2. <https://doi.org/10.15446/acag.v67n2.66109>
- Aduvire, O. (2006). *DRENAJE ACIDO DE MINA GENERACIÓN Y TRATAMIENTO*. Instituto Geológico y Minero de España. [https://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258\\_0000001.pdf](https://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf)
- Alvear, P., & Palomeque, R. (2017). *Análisis del inventario del ciclo de vida del ladrillo utilizado en la ciudad de Cuenca: Aspectos energéticos, medio ambientales, sociales, económicos y culturales*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27624>
- American Elements. (2024). *Calcium Chloride*. American Elements. <https://www.americanelements.com/calcium-chloride-10043-52-4>
- Arenas Herrera, G., & Ponce, K. (2021). *Análisis de los métodos de tratamientos biológicos en procesos mineros para la gestión de aguas residuales y relaves*. <https://hdl.handle.net/20.500.12590/16746>
- Arrieta, J., Ordoñez, Y., Izzo, R., & Leindorf, J. (2019, octubre 17). *Avances en geopolimerización. Biocementación, bioclogging: Revision del estado del arte*.
- Arunachalam, K. P., Avudaiappan, S., Maureira, N., Da Costa Garcia Filho, F., Monteiro, S. N., Batista, I. D., & de Azevedo, A. R. G. (2023). Innovative use of copper mine tailing as an additive in cement mortar. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 2261-2274. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.066>
- Ascuña, V., Zela, J., Bolaños, H., Mamani, P., Huamani, R., & Huanca, P. (2018). Tratamiento de soluciones de cianuro y precipitación de metales cianicidas por reacción con peróxido de hidrógeno y soda caustica, el método perso; obtención de lodos económicamente útiles. *Revista Boliviana de Química*, 35(5), 155-161.

- AW, S., Faruq, T., Singh, D., & Zaharin, A. (2021). Distribution of Heavy Metals Fractionation in Gold Mine Tailing Amended with Non-Coated and Iron-Coated Rice Husk Ash. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1867504>
- Bao, S., Di, J., Dong, Y., Gao, Z., Gu, Q., Zhao, Y., & Zhai, H. (2024, enero 12). Experimental study on the effect of cementation curing time on MICP bio-cemented tailings. *Construcción y materiales de construcción*, 411. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823039818>
- Bascuñán, A. (2022). *POSTE ELÉCTRICO DE HORMIGÓN AUTO-REGENERANTE POR FERMENTACIÓN BACTERIANA* [Pontificia Universidad Católica de Chile]. [https://diseno.uc.cl/memorias/pdf/memoria\\_dno\\_uc\\_2022\\_1\\_BASCUNAN\\_SALAZAR\\_A.pdf](https://diseno.uc.cl/memorias/pdf/memoria_dno_uc_2022_1_BASCUNAN_SALAZAR_A.pdf)
- Bastías, L. (2014). *Estabilidad química de relaves y escorias: Aplicación de pruebas de lixiviación*. Editorial Académica Española.
- Bauzá, J. (2015). *El tratamiento de los suelos arcillosos con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad*. <http://hdl.handle.net/11441/32957>
- Baylón, A., & Flores, S. (2014). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, 13, 075. <https://doi.org/10.15381/idata.v13i2.6193>
- Baziz, A., Souad, K., Houssama, S., & Nedjima, B. (2023). Valorización de relaves de mineral de oro de la mina Amesmessa en mortero de cemento: Propiedades mecánicas, químicas y de microestructura = Valorization of gold ore tailing from Amesmessa mine in cement mortar: mechanical, chemical and microstructure properties. *Anales de Edificación*, 8(1), 22-26. <https://doi.org/10.20868/ade.2022.5018>
- BECOSAN. (2020). ¿Por qué el hormigón es resistente al fuego? *BECOSAN®*. <https://www.becosan.com/es/faq/por-que-el-hormigon-es-resistente-al-fuego/>
- Beltrán, F., Nieto, A., Murillo, J. A., Ruiz, F., Troyo, E., Alcala, J., & Murillo, B. (2019). *Contenido inorgánico de nitrógeno, fósforo y potasio de abonos de origen natural para*

su uso en agricultura orgánica.

<https://www.redalyc.org/journal/573/57363023006/html/>

Beltrán, L., Larrahondo, J., & Cobos, D. (2018). Tecnologías emergentes para disposición de relaves: Oportunidades en Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 44, Article 44.

<https://doi.org/10.15446/rbct.n44.66617>

Blasi, A., Civit, J., Prenafeta, F., Fernández, B., & Ripoll, X. (2010). *Libro de Actas II Congreso Español de Gestión Integral de Deyecciones Ganaderas: Barcelona, 9-10 de junio de 2010. International Workshop on Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Waste. Barcelona, 11 de junio 2010.* Ecofarm.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=497583>

Bruton, M., & Purrington, J. (2023, julio 31). *Innovación en la deshidratación de relaves.* WSP.

<https://www.wsp.com/es-co/insights/innovacion-en-deshidratacion-de-relaves>

Calderón, J., Morillo, D., & Romero, J. (2022). DESARROLLO DE ADOQUINES A PARTIR DE LOS RELAVES DE MINA. *Perfiles*, 1(27), Article 27.

<https://doi.org/10.47187/perf.v1i27.151>

Carmignano, O., Vieira, S., Teixeira, A., Lameiras, F., Brandão, P., & Lago, R. (2021). *Iron Ore Tailings: Characterization and Applications.* 32(10), 1895-1911.

<https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>

Cavero, M. (2017, febrero 21). *Bioremediación de relaves y botaderos mineros.* Gidahatari.

<https://gidahatari.com/ih-es/bioremediacion-relaves-botaderos-mineros>

Ceniceros, A., Macías, K., de la Cruz, J., Gutiérrez, M., & Martínez, G. (2018). Characterization of mining tailings in México for the possible recovery of strategic elements. *Journal of South American Earth Sciences*, 88, 72-79.

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.08.013>

CETAQUA. (2021, diciembre 22). Biocementación: La solución para la gestión de relaves mineros en Chile. *Cetaqua*. <https://www.cetaqua.com/biocementacion-la-solucion-para-la-gestion-de-relaves-mineros-en-chile/>

- Climate Partner. (2024). *Factores de emisión*. ClimatePartner. <https://www.climatepartner.com/es/conocimientos/glosario/factores-de-emision>
- Cordero, C., Marchevsky, N., Chiacchiarini, P., & Giaveno, M. (2022). Caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave, en busca de alternativas de reutilización. *Minería y Geología*, 38(1), 70-82.
- Cupa Stone. (2019, agosto 22). Las 5 preguntas más habituales sobre piedra natural. *Cupa Stone | España*. <https://www.cupastone.es/las-5-preguntas-habituales-sobre-piedra-natural/>
- Elon Musk (Director). (2020, noviembre 1). *Tratamiento de Aguas Ácidas de Mina* [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=R2p20FJPZkY>
- Enríquez, A., Collahuazo, L., Hermosa, P., Acosta, M., Feijoo, C., Quezada, M., & Ibarra, D. (2022). Estudio de caso para el aprovechamiento de relaves mineros procedentes de la concesión Campanillas, Zamora Chinchipe-Ecuador, como agregado para la elaboración de adoquines. *Revista Científica GeoLatitud*, 5(1), Article 1.
- Escuela de Ingeniería Bioquímica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. (2019, mayo 31). *Biocementación: Una alternativa para mejorar la administración de relaves mineros*. <http://www.pucv.cl>. <http://www.pucv.cl/uuaa/escuela-de-ingenieria-bioquimica/publicaciones/biocementacion-una-alternativa-para-mejorar-la-administracion-de>
- Espín, D., Jarrín, J., & Escobar, O. (2021). *MANEJO, GESTIÓN, TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RELAVES MINEROS GENERADOS EN EL PROYECTO RÍO BLANCO*. | *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-seguridad-defensa/article/view/RCSDV2N4ART1>
- Euroinnova Business School. (2023, febrero 20). *Qué es y cómo contabilizar la huella de carbono*. Euroinnova Business School. <https://www.euroinnova.edu.es/blog/que-es-y-como-contabilizar-la-huella-de-carbono>

- Fu, T., Saracho, A., & Haigh, S. (2023). Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: A comprehensive review. *Biogeotechnics*, 1(1), 100002. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100002>
- Fundacion Chile, & Servicio Nacional de Geologia y Minería. (2015). *Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras*. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/GuiaMetodologicaQuimica.pdf>
- Garcés, I. (2017). *Manejo Ambiental de Residuos Mineros*. [https://www.researchgate.net/publication/352573742\\_Manejo\\_Ambiental\\_de\\_Residuos\\_Mineros](https://www.researchgate.net/publication/352573742_Manejo_Ambiental_de_Residuos_Mineros)
- Garrido, C. (2019). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE APROVECHAMIENTO DE RELAVE ABANDONADO DE COBRE* [Universidad Andres Bello]. <https://core.ac.uk/download/pdf/288901148.pdf>
- GOV.UK. (2024, octubre 30). *Government conversion factors for company reporting of greenhouse gas emissions*. GOV.UK. <https://www.gov.uk/government/collections/government-conversion-factors-for-company-reporting>
- Herrera, J. (2017). *Introducción a la Minería. Vol. I: Conceptos, tecnologías y procesos* (2.a ed.). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.63396>
- Herrera, J. (2019). *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. I: Características generales*. (2.a ed.). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.62723>
- Hu, L., Wu, H., Zhang, L., Zhang, P., & Wen, Q. (2016). Geotechnical Properties of Mine Tailings. *Revista de Materiales En Ingeniería Civil*, 29(2). <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001736>

- Hurtado, J., & Berastain, A. (2012). Optimización de la biorremediación en relaves de cianuración adicionando nutrientes y microorganismos. *Revista Peruana de Biología*, 19(2), 187-192.
- iAguá. (2013, diciembre 23). *Agua, cianuro y minería del oro: 30 años de accidentes* [Text]. iAguá; iAguá. <https://www.iagua.es/blogs/plataforma-salvemos-cabana/agua-cianuro-y-mineria-del-oro-30-anos-de-accidentes>
- INGEMMET & BGR. (2023). Caracterización geoquímica y mineralógica de relaves mineros La Ciénaga – La Libertad. *MINSUS*. <https://minsus.net/Media-Publicaciones/caracterizacion-geoquimica-y-mineralogica-de-relaves-mineros-la-cienaga-la-libertad/>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (1987). *NTE INEN 1488: Adoquines. Requisitos*. <http://archive.org/details/ec.nte.1488.1987>
- Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones. (2024). Componentes y propiedades del cemento | Características. *ieca*. <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/>
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Vol. 3 Procesos industriales y uso de productos*. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/3\\_Volume3/V3\\_2\\_Ch2\\_Mineral\\_Industry.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/3_Volume3/V3_2_Ch2_Mineral_Industry.pdf)
- Kim, G., Alam, M., Lee, J., Kim, G., Kim, P., & Khan, M. (2017). Assessment of direct carbon dioxide emission factor from urea fertilizer in temperate upland soil during warm and cold cropping season. *European Journal of Soil Biology*, 83, 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.10.005>
- Kuranchie, F. A., Shukla, S. K., Habibi, D., & Mohyeddin, A. (2015). Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. *Cogent Engineering*, 2(1), 1083137. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1083137>

- La Hora. (2024, abril 15). *Estudio pionero convierte residuos mineros en adoquines para infraestructura vial*. <https://www.lahora.com.ec/loja/estudio-pionero-convierte-residuos-mineros-en-adoquines-para-infraestructura-vial/>
- Labiser. (2020). *Suelos Sódicos y Salino-Sódicos | Suelos Agrícolas*. Labiser. <https://labiser.es/suelos-sodicos-y-salino-sodicos/>
- Lalangui, L., & Méndez, D. (2021). *Caracterización de relaves mineros para su aprovechamiento en la fabricación de materiales de construcción* [Thesis, ESPOL. FICT]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/55505>
- Lam, E., Zetola, V., Ramirez, Y., & Montofre, Í. (2020). *Making Paving Stones from Copper Mine Tailings as Aggregates*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/340412334\\_Making\\_Paving\\_Stones\\_from\\_Copper\\_Mine\\_Tailings\\_as\\_Aggregates](https://www.researchgate.net/publication/340412334_Making_Paving_Stones_from_Copper_Mine_Tailings_as_Aggregates)
- Lemos, M., Valente, T., Reis, P., Fonseca, R., Delbem, I., Ventura, J., & Magalhães, M. (2020). Mineralogical and Geochemical Characterization of Gold Mining Tailings and Their Potential to Generate Acid Mine Drainage (Minas Gerais, Brazil). *ResearchGate*. <https://doi.org/10.3390/min11010039>
- Lojano, G., & Robles, J. (2022). *Análisis de la resistencia a la compresión simple en morteros utilizando relave minero de la planta de beneficio Goldserviplant Cia Ltda, Portovelo-El Oro*. [bachelorThesis, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12519>
- LUNDING GOLD. (2022). *MEMORIA DE SOSTENIBILIDAD*. <https://frutadelnorte.com/pdf/Memoria-de-Sostenibilidad-esp-2022.pdf>
- LUNDING GOLD. (2023, diciembre 31). Fruta del Norte Minería Responsable Ecuador que construye futuro. *Fruta del Norte*. <https://frutadelnorte.com/lundin-gold-fruta-norte/>
- Manrique, M., & Agurto, A. (2022). Caracterización geoquímica y mineralógica de relaves mineros La Ciénaga – La Libertad—[Boletín B 78]. *Repositorio Institucional INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3702>

- Mapinduzi, R., Bujulo, B., & Mwegoha, W. (2016). *Potencial de reutilización de relaves de minas de oro como materiales de construcción secundarios y Fitorremediación*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/318659646\\_authors-Licensee\\_IPA-Under\\_Creative\\_Commons\\_license\\_30\\_Potential\\_for\\_reuse\\_of\\_gold\\_mine\\_tailings\\_as\\_secondary\\_construction\\_materials\\_and\\_Phytoremediation](https://www.researchgate.net/publication/318659646_authors-Licensee_IPA-Under_Creative_Commons_license_30_Potential_for_reuse_of_gold_mine_tailings_as_secondary_construction_materials_and_Phytoremediation)
- Masferrer, V. (2019). *Art Toolkit | Materiales: Arcilla*. <https://art-toolkit.recursos.uoc.edu/es/materiales-arcilla/>
- Mesa, D., Paredes, O., Sandoval, S., & Pietro, G. (2020). *ATLAS GEOQUÍMICO DE COLOMBIA CONCENTRACIÓN DE SILICIO (SiO<sub>2</sub>)*. [https://srvags.sgc.gov.co/Archivos\\_Geoportal/Amenaza\\_Sismica/Atlas\\_Geoquimico\\_2020/pdf/35.SiO2.pdf](https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Amenaza_Sismica/Atlas_Geoquimico_2020/pdf/35.SiO2.pdf)
- Minerals&Fillers. (2023, junio 5). *Mica*. Minerals Fillers. <https://mineralsfillers.com/mica/>
- Ministerio de energía y minas. (2022). *Factor de emisión de CO<sub>2</sub> del sistema nacional interconectado del Ecuador*.
- Ministerio de Minería. (2002). *Gestión de Residuos Industriales Sólidos Mineros y Buenas Prácticas*.
- Montoya, C. (2021). *Plasticidad, granulometría y clasificación de suelos*. Universidad del Quindío. [https://aulasvirtuales.uniquindio.edu.co/RecDigital/MecanicaDeSuelos/recursos/unidad3/Descargable\\_EA1.pdf](https://aulasvirtuales.uniquindio.edu.co/RecDigital/MecanicaDeSuelos/recursos/unidad3/Descargable_EA1.pdf)
- Moreno, R. (2023). Restauración geomorfológica sobre depósitos de relaves: Caso de estudio aplicado a la concesión minera Río Blanco, Ecuador. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 37(1), 130-141. <https://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.10>
- Olgún, S., Araya, V., Suazo, G., & Villavicencio, G. (2022). Aplicación de herramientas de monitoreo DinSAR de deformaciones para el estudio de fallas en depósitos de relaves. *Obras y proyectos*, 31, 85-94. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132022000100085>

- Oliveira, T., Generoso, F., Silva, T., Sant'Anna, G., Silva, C., & Pitanga, H. (2017). Geomechanical properties of mixtures of iron ore tailings improved with Portland cement. *Acta Scientiarum*, 41(2019). <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v41i1.38038>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). 8. *Consistencia del Suelo*. [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s08.htm](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024a). *Propiedades Químicas | Portal de Suelos de la FAO* | <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024b). *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos*. Portal de Suelos de la FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos/es/>
- Osorio, N. (2012). *pH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES*. 1(4). <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>
- Palencia, D. (2023, abril 17). Características del cemento, componentes y aplicaciones. *Cemix*. <https://www.cemix.com/caracteristicas-cemento-aplicaciones/>
- Pandavenes, O., Mendoza, C., & Torrijo, F. (2023). La investigación geofísica en los estudios de balsas de relaves: Su aplicación e inclusión en el ACUERDO No MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM de la República de Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 16(2), 39-57. <https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4488>
- Peña, E., & Menendez, J. (2016). Environmental study of gold mining tailings in the Ponce Enriquez mining area (Ecuador). *DYNA*, 83(195), 237-245. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.51745>

- Perez, N., Perez, A., & Garnica, P. (2019). *Propiedades mecánicas de un suelo estabilizado con "estabilical"*. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=486&IdBoletin=178>
- Pulickal, E., John, A. J., George, A., Suresh, A. M., & Mathew, M. (2021). Enzyme Induced Calcium Carbonate Precipitation and Addition of Strengthening Materials: A Review. *Transactions on Science and Technology*, 8(3), 143-152.
- Qiu, Y., & Segeo, D. (2000). *Laboratory Properties of Mine Tailings*. <https://era.library.ualberta.ca/items/2952247d-01ae-4142-8457-5c1b04869f14/view/319069f2-4339-4814-97c2-082c2fcbdda6/Laboratory-20properties-20of-20mine-20tailings.PDF>
- Quispe, E. (2021). Análisis del relave filtrado como sustituto del relleno estructural para terraplenes de relaves filtrados, Unidad Cerro Lindo – Chavín – Chincha. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/71150>
- Ramirez, D. (2020). *FACTIBILIDAD DE EXTRACCIÓN DE COBALTO EN RELAVES MINEROS- PROYECTO EL ROBLE*.
- Ramos, M., & Pérez, M. (2021). *Caracterización de relaves mineros en estado natural y estabilizados con cemento, enfocados a la construcción*. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.2.010>
- Romero, E. (2007). *Residuos mineros*. <https://www.uhu.es/emilio.romero/docencia/residuos.htm>
- Ruíz, C. V. (2020). *Precipitación de carbonatos inducida microbiológicamente como alternativa para remediar entornos naturales contaminados con metales y metaloides tóxicos*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78261>
- Saldías, A. R., Valenzuela, M. V., & Vera, C. O. (2022). *Caracterización del comportamiento mecánico de probetas de mortero con reemplazo de relave de cobre*.
- Sánchez, Y. (2019). *Estudio del relave minero de la planta de beneficio santa lucía código 191038 del sector la maravilla de la parroquia pucará, cantón pucará, provincia del Azuay, con fines de utilización en morteros de pega de unidades de mampostería*.

- [bachelorThesis, Loja: Universidad Nacional de Loja].  
<https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/21631>
- Scheinost, A., & Singh, B. (2023). Metal oxides. En M. Goss & M. Oliver (Eds.), *Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition)* (pp. 135-148). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00069-0>
- SERNAGEOMIN. (2023, junio 26). Preguntas Frecuentes sobre Relaves. *SERNAGEOMIN*.  
<https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- SERNAGEOMIN. (2024). Preguntas Frecuentes sobre Relaves. *SERNAGEOMIN*.  
<https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- Soriano, M. (2018a). *CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IONICO DEL SUELOS*.  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/105088>
- Soriano, M. (2018b). *Conductividad eléctrica del suelo*.  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/105110>
- Soriano, M. (2018c). *Origen y causas de la Capacidad de Intercambio iónico en el suelo*.  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/105109>
- Soriano, M. (2018d). *pH del suelo*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/102382>
- Sparks, D. (2003). 10—The Chemistry of Saline and Sodic Soils. En *Environmental Soil Chemistry (Second Edition)* (pp. 285-300). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/B978-012656446-4/50010-4>
- Sparks, D., Singh, B., & Siebecker, M. (2024). Chapter 10—The Chemistry of Saline and Sodic Soils. En *Environmental Soil Chemistry (Third Edition)* (pp. 411-438). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14034-1.00010-1>
- TEXfire. (2024). *UNE-EN 13501-1 Clasificación de reacción al fuego de los productos de construcción*. <https://texfire.net/es/content/une-en-13501-1-clasificacion-de-reaccion-al-fuego-de-los-productos-de-construccion>
- thinkstep-anz. (2022). *Environmental & Corporate Sustainability*. <https://www.thinkstep-anz.com/>

- Universidad Complutense Madrid. (2024). *Servicio Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)*. <https://cai.ucm.es/ciencias-tierra-arqueometria/servicios/determinacion-de-la-capacidad-de-intercambio-cationico-cic/308/>
- USDA. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20y%20Salud%20del%20Suelo.pdf>
- Wakelin, A. (2024, mayo 29). *What is the difference between A1 & A2 Fire Ratings?* Vulcan Cladding Systems. <https://www.vulcansystems.co.uk/blog/what-is-the-difference-between-a1-a2-fire-ratings/>
- Wilcox, S. M., Mulligan, C. N., & Neculita, C. M. (2024). Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation as a Bioremediation Technique for Mining Waste. *Toxics*, 12(2), 107. <https://doi.org/10.3390/toxics12020107>
- Yang, Z., Liu, L., Dong, Y., & Gao, Z. (2024). Estudio comparativo sobre el efecto de SRB y *Sporosarcina pasteurii* en la cementación y solidificación de relaves de plomo y zinc con MICP. *Chemical Engineering Journal*, 495, 153446. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153446>
- Yousuf, S., Shafiq, P., & Ibrahim, Z. (2024). (PDF) The pH of Cement-based Materials: A Review. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1007/s11595-020-2337-y>
- Zapata, S. (2013). *Mejoramiento dle proceso de secado de fachaletas en la empresa Terraforte a traves del estudio de las condiciones de velocidad y temperatura del aire*. Escuela Politecnica Nacional.

## Apéndice

### Apéndice A. Compresión simple

#### Figura A1

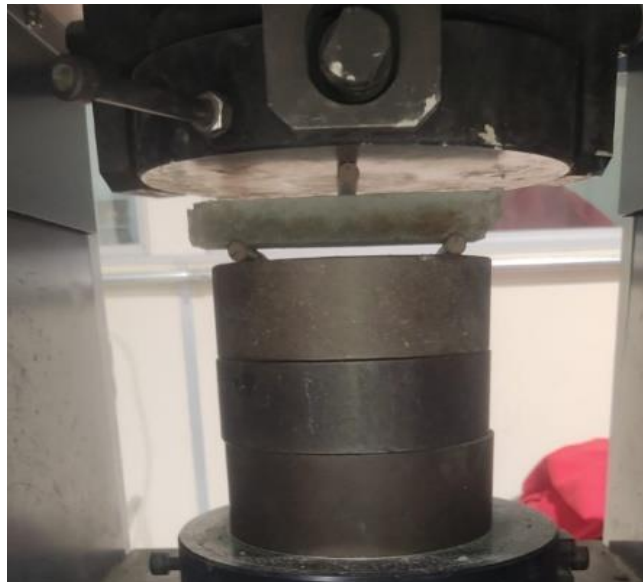
*Ensayo de compresión Simple*



### Apéndice B. Resistencia a la flexión

#### Figura B1

*Ensayo de resistencia a la flexión*



### Apéndice C. Resistencia a la ignición

#### Figura C1

*Ensayo de resistencia a la ignición*



## Apéndice D. Resistencia a la abrasión cualitativa

### Figura D1

*Ensayo de resistencia a la abrasión*



## Apéndice E. Parámetro potencial de hidrogeno

### Figura E1

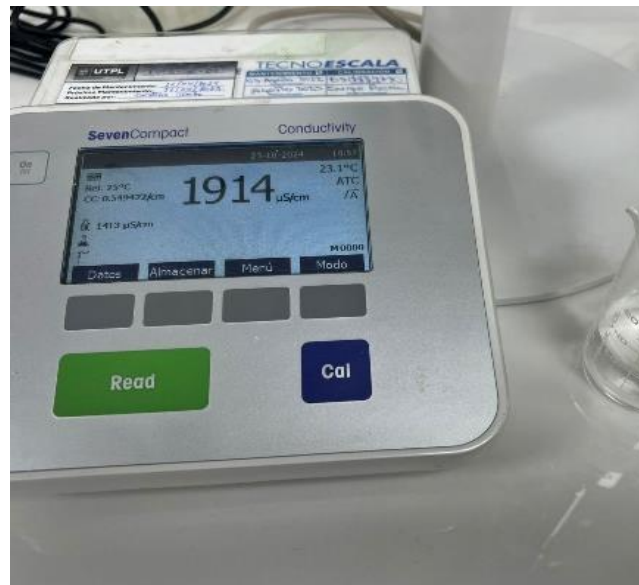
*Análisis de pH*



## Apéndice F. Parámetro conductividad

Figura F1

*Análisis de conductividad*



## Apéndice G. Parámetro metales

Figura G1

*Análisis de presencia de metales*



## Apéndice H. Porcentaje de sodio intercambiable

### Figura H1

*Proceso para calcular el porcentaje de sodio intercambiable*

$$PSI = \frac{100xNa}{\sum Bases\ intercambiables}$$

$$PSI = \frac{100\%x1401mg/kg}{43.8mg/kg + 7638.7mg/kg}$$

$$PSI = 18.23\%$$

## Apéndice I. Porcentaje partículas del suelo

### Figura I1

*Resultados del análisis de textura*

