



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Elaboración sostenible de ladrillos a partir de
biocementación de relaves mineros**

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

INGENIERO AMBIENTAL

Autor: Nagua Panamito, Nahyn Andres

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, 07 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: Elaboración sostenible de ladrillos a partir de biocementación de relaves mineros realizado por Nahyn Andres Nagua Panamito 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,

Director: Diana Carolina Diana Jumbo, Mgtr.

C.I.: 1104114119

Correo electrónico: dcjumbo07@utpl.edu.ec

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Nahyn Andres Nagua Panamito, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: Elaboración sostenible de ladrillos a partir de biocementación de relaves mineros, específicamente de los contenidos comprendidos en: Capítulo uno marco teórico, capítulo dos materiales y capítulo tres métodos y resultados, 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: Nahyn Andres Nagua Panamito

C.I.: 1105613366

Correo electrónico: nnnagua@utpl.edu.ec

Dedicatoria

Este trabajo de titulación para la obtención del título de Ingeniero Ambiental se lo dedico primeramente a mis padres Juanito Nagua y Blanca Panamito que han estado conmigo en todo este proceso, desde que entre a la universidad hasta mi graduación dándome ánimos y escuchando.

De igual manera a mis hermanos Alex y Alan que al igual que mis padres han sido un pilar fundamental para poder seguir adelante con esta investigación. A mi tía Soledad quien ha sido mi modelo a seguir profesionalmente y su apoyo como segunda madre para mi ha sido una gran inspiración para que desarrolle mi trabajo de titulación.

Agradecimiento

Quiero agradecer primeramente a Dios por brindarme la salud y sabiduría necesaria para el desarrollo de mi trabajo de titulación.

A mis padres y a mi tía Soledad, que estuvieron pendientes de todo mi proceso de titulación, aportándome todos los recursos necesarios para poder estudiar y apoyándome en todo el transcurso de mis estudios.

A mis hermanos, por su compañía y palabras alentadoras.

A mis mejores amigos Max y Máximo, por ser las personas que ha estado siempre conmigo desde el colegio.

A Sarita, por estar siempre presente en esta etapa, apoyándome en cualquier instancia y escuchando cada uno de mis problemas, alentándome a seguir adelante.

A mi tutora de tesis Mgtr. Diana Jumbo, por todas sus enseñanzas, por estar presente en cada momento, guiándome en el progreso de mi trabajo de titulación y apoyándome en todo lo que ha podido.

Por último, a mis compañeros y compañeras, con quienes compartí todo este proceso y pase momentos especiales.

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
1.2 Residuos mineros	5
1.2.1 <i>Relaves mineros</i>	6
1.2.2 <i>Caracterización de relaves</i>	6
1.2.3 <i>Parámetros de caracterización de relaves</i>	7
1.3 Tratamiento y aprovechamiento de relaves	8
1.4 Nuevos materiales de construcción sostenibles	9
1.4.1 <i>Biocementación</i>	9
1.4.2 <i>Sporosarsina pasteurii</i>	10
1.5 Marco legal	10
Capítulo dos	12
Materiales y métodos.....	12
2.1 Zona de estudio.....	12
2.2 Materiales	12
2.2.1 <i>Relave de mina</i>	13
2.2.2 <i>Sporosarcina pasteurii</i>	13

2.2.3	<i>Moldes de acero o hierro</i>	13
2.3	Metodología	14
2.3.1	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	14
2.3.2	<i>Elaboración de probeta testigo</i>	14
2.3.3	<i>Elaboración de prototipo de ladrillo</i>	15
2.3.4	<i>Caracterización del relave minero</i>	15
2.3.5	<i>Pruebas para elaborar el ladrillo</i>	20
2.3.6	<i>Cálculo de la huella de carbono</i>	22
	Capítulo tres	24
	Resultados	24
3.1	Caracterización fisicoquímica	24
3.1.1	<i>Potencial de hidrógeno</i>	24
3.1.2	<i>Conductividad Eléctrica</i>	25
3.1.3	<i>Carbonatos</i>	26
3.1.4	<i>Capacidad de intercambio catiónico</i>	27
3.1.5	<i>Límites de Atterberg</i>	28
3.1.6	<i>Metales pesados</i>	29
3.1.7	<i>Bases intercambiables</i>	30
3.1.8	<i>Fluorescencia de rayos X (FRX)</i>	31
3.1.9	<i>Difracción de rayos X (DRX)</i>	33
3.2	Caracterización mecánica	34
3.2.1	<i>Compresión simple</i>	34
3.2.2	<i>Resistencia a la flexión</i>	35
3.2.3	<i>Resistencia al fuego</i>	36
3.3	Huella de carbono	38
3.4	Discusión	40
	Conclusiones	46
	Recomendaciones	48

Referencias	49
Apéndice.....	57
Apéndice A. Pretratamiento del relave	57
Apéndice B. Análisis del pH y conductividad eléctrica.....	58
Apéndice C. Análisis de carbonatos	59
Apéndice D. Análisis de CIC	59
Apéndice E. Análisis de textura	60
Apéndice F. Ladrillos elaborados	61
Apéndice G. Ensayo de compresión simple	61
Apéndice H. Ensayo de flexión	62
Apéndice I. Ensayo de resistencia al fuego	62
Apéndice J. Ensayo de abrasión	63

Índice de tablas

Tabla 1 Actividad ureasa de diferentes microorganismos.....	10
Tabla 2 Factores de emisión de los insumos del ladrillo biocementado	22
Tabla 3 Datos de resistencia a la abrasión	37

Índice de figuras

Figura 1 Mapa de ubicación del área de estudio	12
Figura 2 Molde de acero 5x5x5 cm	13
Figura 3 Moldes de hierro 9x4x16 cm.....	14
Figura 4 Pruebas para realizar el ladrillo.....	21
Figura 5 Datos de potencial de hidrógeno (pH)	25
Figura 6 Datos de conductividad eléctrica.....	26
Figura 7 Datos de porcentaje de carbonatos	27
Figura 8 Datos de capacidad de intercambio catiónico	28
Figura 9 Datos de límites de Atterberg.....	29

Figura 10 Datos de la cuantificación de metales	30
Figura 11 Datos de cuantificación de bases intercambiables	31
Figura 12 Datos de fluorescencia de rayos X (método Mining Light Elements).....	32
Figura 13 Datos de fluorescencia de rayos X (método Soil FP)	33
Figura 14 Datos difracción de rayos X	34
Figura 15 Datos de resistencia a la compresión simple.....	35
Figura 16 Datos de resistencia a la flexión	36
Figura 17 Datos de la resistencia al fuego	37
Figura 18 Aporte del ladrillo biocementado	38
Figura 19 Aporte del ladrillo convencional	39
Figura 20 Huella de carbono total del ladrillo biocementado vs el convencional	39

Resumen

Esta investigación tiene como propósito evaluar la eficiencia técnica y ambiental de un ladrillo sostenible frente a un ladrillo convencional. La materia prima fue dos tipos de relave minero (relave filtrado y relave no filtrado), procedente del proyecto Fruta del Norte de la empresa canadiense Lundin Gold, ubicada en el cantón Yantzaza, provincia de Zamora Chinchipe. Para el cumplimiento del objetivo se realizó una caracterización química, física y mecánica del relave, y se evaluó la eficacia ambiental del proceso de biocementación empleado en la elaboración del ladrillo sostenible. Este proceso se desarrolló por medio de un microorganismo que realiza la biocementación denominado *Sporosarcina pasteurii*, la cual fue previamente activada, inoculada y aplicada al relave junto con cemento y una fuente de calcio (cloruro de calcio). Esta bacteria tiene la capacidad de precipitar carbonato de calcio, permitiendo la cohesión de las partículas del relave y su endurecimiento. Los ladrillos obtenidos fueron analizados nuevamente y mostraron que alcanzan una resistencia a la compresión de 15,76 MPa para los elaborados con el relave filtrado y 12,53 MPa con el relave no filtrado, además, de una menor huella de carbono (0,01 Kg CO₂eq/ ladrillo) frente a un ladrillo convencional (0,22 Kg CO₂eq/ ladrillo), convirtiéndolo en una gran alternativa como material de construcción.

Palabras clave: Sporosarcina pasteurii, Biocementación, Relaves mineros, ladrillos

Abstract

The purpose of this research is to evaluate the technical and environmental efficiency of a sustainable brick compared to a conventional brick. The raw material was two types of mining tailings (filtered tailings and non-filtered tailings), from the Fruta del Norte project of the Canadian company Lundin Gold, located in the Yantzaza canton, Zamora Chinchipe province. To achieve this objective, a chemical, physical and mechanical characterization of the tailings was carried out, and the environmental efficiency of the biocementation process used in the production of the sustainable brick was evaluated. This process was developed through a microorganism that carries out biocementation called *Sporosarcina pasteurii*, which was previously activated, inoculated and applied to the tailings together with cement and a calcium source (calcium chloride). This bacteria has the ability to precipitate calcium carbonate, allowing the cohesion of the tailings particles and their hardening. The bricks obtained were analyzed again and showed that they reach a compressive strength of 15.76 MPa for those made with filtered tailings and 12.53 MPa with unfiltered tailings, in addition to a lower carbon footprint (0.01 Kg CO₂eq/brick) compared to a conventional brick (0.22 Kg CO₂eq/brick), making it a great alternative as a construction material.

Keywords: *Sporosarcina pasteurii*, Biocementation, Mining tailings, bricks

Introducción

Los ladrillos convencionales han sido usados para la construcción desde hace años. A nivel mundial, se estima una producción anual de 1500 billones de ladrillos. El proceso de producción emplea la cocción de estos a altas temperaturas, provocando la liberación de contaminantes atmosféricos, como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas, afectando gravemente a las personas, animales, plantas e incluso la contaminación del agua (Melo, 2023). Por este motivo, se ha desarrollado otras metodologías para la elaboración de ladrillos sostenibles, con la finalidad de reducir el impacto ambiental que ha ido en aumento con la demanda de construcción de edificaciones por el alto índice poblacional, tal es el caso del aprovechamiento de residuos industriales, siendo una de ellas la minería.

En Ecuador la minería es una de las actividades que mayor impacto económico otorga al país. Según un estudio elaborado por Grupo Spurrier (2022) y presentando en la Cámara de la Minería, se menciona que, en las próximas tres décadas, las exportaciones mineras en el país sumarán USD 176,395 millones, basándose en 12 grandes proyectos que actualmente se mantienen en operación y que se espera que tengan una vida útil hasta 2052 (Torres, 2022). Sin embargo, la actividad minera puede generar una gran contaminación al ambiente y a la salud, puesto que, maneja distintos químicos y reactivos para su operación, además, de generar residuos como: Escombros de material estéril, canteras, infraestructura abandonada, relaves, etc. Estos residuos pueden aprovecharse para la generación de subproductos otorgándoles un valor agregado, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la economía circular.

Los relaves son los desechos resultantes del procesamiento de minerales, como las operaciones de trituración y molienda de la roca. Se pueden clasificar en tres tipos: Relave espesado, filtrado y en pasta. Estos relaves contienen partículas finas de roca, lodo y otros materiales o químicos que no contengan el mineral deseado. En el peor de los casos puede contener cantidades de cianuro, mercurio, arsénico, plomo, aluminio y otros metales pesados y sustancias tóxicas. Si estos elementos tóxicos se liberan directamente o por escorrentía en el agua que se filtra a través de los relaves y las aguas residuales, pueden producir efectos

nocivos para los seres humanos y el ambiente. Por este motivo, su tratamiento y aprovechamiento es importante para evitar estos graves impactos (UTEM, 2021).

El manejo de los relaves mineros debe incluir técnicas que permitan reducir o eliminar los riesgos de colapso, infiltración y escorrentía, esto se puede lograr con la construcción de obras civiles de control. De igual manera las empresas mineras deben incluir un plan de eliminación y reaprovechamiento de relaves, que contiene procesos de gestión, tratamiento y recirculación de las aguas residuales producidas, basándose en la normativa ambiental (SBG, 2021). En investigaciones como la de Reyes (2023) usaron estos residuos provenientes de la actividad minera del norte de Chile, para la elaboración de ladrillos ecológicos con el objetivo de mitigar el impacto ambiental de los residuos mineros de esta zona y dar un valor agregado a estos residuos. Dando bastantes ventajas tanto las mencionados, como también el ahorro que pueden obtener las empresas mineras para el manejo de relaves, que según datos de Flores (2017) podría llegar ser hasta el 75% de disminución de costos, así como, la reducción de la contaminación del suelo, agua y aire.

En la provincia de Zamora Chinchipe, actualmente, opera la empresa minera Lundin Gold con el proyecto Fruta del Norte. Durante su proceso de producción, genera dos tipos de residuos mineros. El primero es el relave no filtrado, obtenido de la extracción de mineral y almacenado en relaveras. El segundo es el relave filtrado, que se convierte en una pasta de relleno al combinarse con cemento. Esta pasta se utiliza para estabilizar y rellenar las cámaras subterráneas de la mina (Cardno, 2018). Por lo antes mencionado, en el presente trabajo se evaluó la eficacia técnica y ambiental de un ladrillo sostenible frente a un ladrillo convencional, con el propósito de fortalecer al estudio de nuevas técnicas de elaboración de materiales para construcción que sean eficientes y amigables con el ambiente. Llevando a cabo distintas etapas como la selección del material adecuado mediante características físicas y química, la determinación de la mezcla más apropiada de las distintas materias primas, empleando ensayos de resistencia para el ladrillo y comprobar si este cumple con los requerimientos mínimos dictados en la INEN 3066.

Capítulo uno

Marco teórico

1.1 Minería

La minería es la actividad económica que se encarga de la obtención selectiva de minerales y otros materiales a partir de la corteza terrestre, donde, es necesario la extracción física de enormes cantidades de materiales de esta, para recuperar solo pequeñas cantidades del producto deseado. El objetivo de la minería es obtener minerales o combustibles, siendo una de las actividades más antiguas e importantes para la vida de toda sociedad (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2020).

1.2 Residuos mineros

Los residuos mineros son aquellos desechos sólidos, acuosos o en pastas, generados a partir de las actividades de extracción, explotación y de investigación. Para su correcta gestión se deben regir a las legislaciones de minas de cada país, ya que, sin un buen manejo de estos puede traer graves consecuencias al medio ambiente como a las personas (Hernández et al., 2023).

En investigaciones como la de Jiménez et al. (2023), se menciona que la minera de roca ornamental genera enormes volúmenes de residuos en forma de lodo durante todo el proceso de transformación y reducción del bloque, al no tener estos salida comercial son depositados en el vertedero ocasionando grandes impactos ambientales y económicos, como la posible inhalación de este residuos que podría ser muy peligroso para la salud, además, sus depósitos pueden cambiar la mecánica de los suelos produciendo cambios en la calidad del agua subterránea y la generación de gastos por parte de la empresa para el tratamiento, transporte y vertido de estos residuos.

Entonces, poder usar estos residuos para la elaboración de nuevos productos, como son nuevos materiales de construcción es una excelente alternativa para poder evitar estos impactos ambientales y económicos, dándole un valor agregado para que pueda entrar a

posibles mercados de manera que se aplique el principio de la economía circular, contribuyendo con el desarrollo sostenible que en la actualidad tanto se anhela.

1.2.1 Relaves mineros

De acuerdo con el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (2018), define el relave como “un sólido finamente molido, que se descarta en operaciones mineras y son destinados a depósitos impermeabilizados de gran tamaño para garantizar su inocuidad”.

Según Bravo (2023) la composición de los sólidos sedimentados en los tanques de relaves es variada y depende de las características del mineral como de los procesos a que ha sido sometido. Contendrán los materiales no recuperados por la minería como As (arsénico), Cd (cadmio), Cu (cobre), Pb (plomo), Cr (cromo), Hg (mercurio), etc., además de reactivos necesarios en el proceso de procesamiento del mineral de interés. Pudiendo causar graves impactos hacia el ambiente y a la salud de las personas (Utem, 2021).

1.2.2 Caracterización de relaves

Los relaves generados del triturado del mineral tienen un tamaño que varía desde centímetros hasta milímetros ($< 100 \mu\text{m}$). Están constituido por elementos como: cuarzo, feldespatos de potasio (KAlSi_3O_8), feldespatos de sodio ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Feldespatos de calcio ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$), calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), etc., que hacen que se los pueda considerar como una materia prima importante en los procesos de geopolimerización (Petroenergía, 2021).

La caracterización de los relaves es importante para emplearlo en la elaboración de nuevos materiales de construcción, pues características como el potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), textura, carbonatos, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los límites de Atterberg, son los que otorgan información de su composición real. Con ello poder saber en qué proporciones se lo puede usar con los demás elementos para la elaboración del material de construcción (Lalangui et al., 2021).

1.2.3 Parámetros de caracterización de relaves

A. Potencial de hidrógeno (pH):

Mide la concentración de iones de hidrógeno en el relave, teniendo una escala del 1 al 14 donde los valores más bajos (<7) representan un medio ácido, mientras que, un valor elevado (>7) indica una baja concentración de iones de hidrógeno, y debido a esto se vuelve un medio alcalino, pH=7 indica el valor neutro de una solución. El pH es un factor importante en la caracterización del relave, pues que tenga un valor más bajo o alto puede afectar en la solubilidad y movilidad de los metales pesados, así como demás elementos que pueden influir en el resultado final del ladrillo (Mendoza et al., 2021).

B. Conductividad Eléctrica (CE):

Mide la capacidad de una solución para conducir electricidad a través de sus partículas, su unidad de medida es el Siemens. En la biocementación de relaves mineros, este parámetro es un indicador de la disponibilidad de iones necesarios para la precipitación de carbonato de calcio (Uría et al., 2020).

C. Carbonatos:

Permite medir la cantidad de carbonatos, principalmente en forma de calcita (CaCO_3) y dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], los cuales pueden llegar afectar la química (pH y capacidad de intercambio catiónico) del relave. Es importante conocer el contenido de carbonatos, debido a que es el principal material para que se haga la biocementación y los microorganismos puedan precipitar carbonato de calcio, para formar enlaces que mejoren la cohesión y resistencia óptima (Livia et al., 2022).

D. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC):

Determina la capacidad que tiene el relave para retener y liberar iones positivos o el número total de cationes intercambiables que un material o suelo en particular es capaz de retener, esta expresada en miliequivalentes de carga positiva por 100 gramos de relave (meq/100g). En la biocementación de los relaves este parámetro es esencial para saber si hay la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, retención de cationes de calcio

necesarios para la precipitación del carbonato de calcio (CaCO_3) y la capacidad que tiene para amortiguar cambios en la química de este (Caballero & Herrera, 2014).

E. Límites de Atterberg:

Determinan los contenidos de humedad que caracterizan los cuatro estados de consistencia de un suelo de grano fino (sólido, semisólido, plástico y semilíquido). El límite entre los estados sólido y semisólido se denomina "Limite de retracción", entre los estados semisólido y plástico se denomina "Limite plástico", finalmente entre un estado plástico y semilíquido "Limite Liquido" (Sánchez, 2019). Siendo estos dos últimos límites los que se emplean, debido a que ayudan a ajustar el contenido de agua en la mezcla para una buena docilidad durante el moldeado de los ladrillos, facilita encontrar la humedad adecuada para favorecer la precipitación del carbonato de calcio (CaCO_3) y asegurar una mayor resistencia del material con contenidos de agua optimizados (Musso & Suazo, 2019).

1.3 Tratamiento y aprovechamiento de relaves

Por las posibles afectaciones al ambiente, los relaves mineros deben tener un especial tratamiento, para así garantizar su buen procesamiento. Lo habitual es el uso de relaveras, que según el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No renovables del Ecuador (2020), son una obra civil que permite almacenar los relaves provenientes de la fase de beneficio de toda actividad minera, contenidos en una obra estructurada en forma segura y de carácter permanente. Estas relaveras, deben ser impermeabilizadas para evitar filtraciones y afectaciones a las aguas subterráneas, así como dar un monitoreo continuo de la estructura para evitar posibles rupturas de los depósitos (Alonso-Pandavenes et al., 2023).

Por otro lado, los relaves mineros pueden ser aprovechados para distintas actividades y no ser considerados simplemente un desecho más. Una aplicación de este que ha ido en aumento es la de emplearlo para el relleno de minas, la cual según Tipian (2023) se los puede usar para mejorar la sostenibilidad de la mina y sellar las excavaciones realizadas al término de las actividades mineras, con esto, mejora el proceso integral y de seguridad de los procesos de excavación, generando un menor impacto ambiental, un menor costo y mejora el ciclo de explotación minera.

La reutilización de relaves mineros como agregados de materiales de construcción es tema de varias investigaciones, pues en países como Perú La Comisión de Energía Y Minas del Congreso, implementó una ley que promueve la transformación de los relaves mineros en productos de uso para la industria de la construcción, como son ladrillo, tejas, baldosas y otros fines (Cruz, 2022).

1.4 Nuevos materiales de construcción sostenibles

La construcción ha sido siempre un pilar importante para toda sociedad, pues por medio de la elaboración de nuevas obras civiles como carreteras, puentes, hospitales, viviendas, se impulsa la inversión tanto pública como privada, generando una mayor cantidad de empleos, y con esto una mayor calidad de vida para la población (Eugenio, 2023). Sin embargo, esta industria se encuentra en un punto, donde la sostenibilidad e innovación tecnológica son pilares fundamentales para el desarrollo de este en el futuro, saliendo en auge el nombre de la “construcción sostenible”.

Cipyacs (2024) define a la construcción sostenible, como la adopción de prácticas y técnicas que disminuyan el impacto ambiental, promuevan la eficiencia eléctrica, y prioricen el bienestar de las comunidades locales. Aspectos que van desde la reducción de emisiones de carbono hasta la gestión responsable de los recursos naturales, atribuyendo al desarrollo sostenible.

1.4.1 Biocementación

Según Chu et al. (2014) la biocementación es un proceso que une partículas del suelo con minerales y otras sustancias, con el objetivo de aumentar la resistencia a la compresión. Especialmente con el uso de microorganismo que logran precipitar sustancias como el carbonato de calcio, la cual posteriormente cohesiona las partículas del material, y logra aumentar su resistencia para ser aprovechados para varias aplicaciones como la estabilización de suelos, elaboración de materiales para la construcción, reducción de la permeabilidad, etc. (Hernández-Piedrazul et al., 2022).

1.4.2 *Sporosarsina pasteurii*

Wu et al. (2021) define a *S. pasteurii* como una bacteria Gram positiva aislada del suelo, requiere urea y amonio para crecer y tiene la capacidad de formar esporas en las duras condiciones ambientales para mejorar su supervivencia. Además, es considerado como el microorganismo más usado para la precipitación de calcita inducida por microbios (MICP) debido a su alta actividad ureolítica a comparación con otros organismos (Tabla 1), aunque no es patógena (Lapierre et al., 2020).

Para que se de este proceso MICP, la ureasa se expresa en las células y cataliza la hidrólisis de la urea para formar amoníaco y dióxido de carbono. El amoníaco causa un aumento en el pH y el dióxido de carbono proporciona iones de carbonato para la precipitación del carbonato de calcio, para finalmente la superficie celular reúna iones de calcio debido a grupos cargados negativamente y actúa como sitio de nucleación de precipitados en MICP (Lauchnor et al., 2015; Wu et al., 2021).

Tabla 1

Actividad ureasa de diferentes microorganismos

Microorganismo	Km de ureasa (mol/L)
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	40-130
<i>Brevibacterium amoniagenes</i>	18-72
<i>Providencia stuartii</i>	10,50-71
<i>Proteus mirabilis</i>	13
<i>Artrobacter oxydans</i>	12,5
<i>Staphylococcus saprophyticus</i>	7,36
<i>Klebsiella aerogenes</i>	2,8
<i>Aspergillus nidulans</i>	1,33
<i>Spirulina maxima</i>	0,12

Nota. El valor Km es la constante de Michaelis, medida de la eficiencia con la que una enzima convierte un sustrato en un producto, por Wu et al. (2021, p. 2).

1.5 Marco legal

Para el presente trabajo de titulación, se emplearon distintas normativas vigentes en el Ecuador que dictan principalmente los métodos de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión, requisitos de diseño, control de calidad etc. Teniendo a la NTE

INEN 0294, que determina la resistencia a la compresión de ladrillos cerámicos y la NTE INEN 3066, la cual dicta los requisitos y métodos de ensayo de bloques de hormigón. Se emplean estas normas para conocer si el ladrillo elaborado mediante la biocementación de relaves mineros alcanza esta resistencia dictada en las normativas del país y poder considerarlo como material de construcción.

De igual manera, dentro de la normativa ambiental y minera se tiene documentos legales como: La Constitución de la República del Ecuador, que es la de mayor poder en el país y aplica para toda actividad que se realice dentro del Ecuador, artículos como el 14, 15, 72 y 408 que describen todo lo relacionado con los derechos de la naturaleza, su preservación y el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, aplican para el presente proyecto. Del Código Orgánico del Ambiente (COA), aplican artículos 173, 181, 235, 236, 238 y 239, siendo este el de mayor peso en calidad ambiental, puesto a que habla de las obligaciones de las empresas para el cuidado del medio ambiente.

La ley minera es otro de las normativas fundamentales para tomar en cuenta en el desarrollo del proyecto, principalmente con artículos como 1, 68, 81 y 83 que se relacionan con la gestión de desechos que se produzcan en la fase de operación de cierta actividad extractiva, entrando en ellos la gestión de los residuos mineros que se van a generar.

Capítulo dos

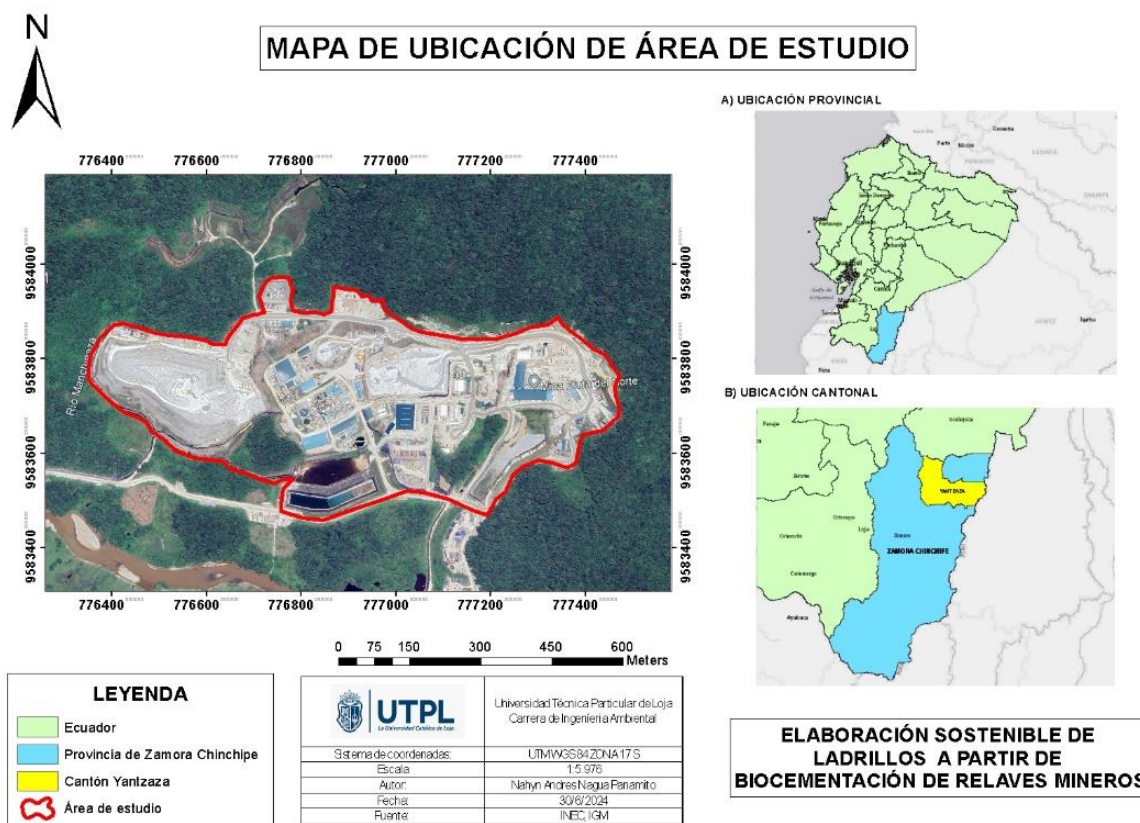
Materiales y métodos

2.1 Zona de estudio

El sector minero “Fruta del Norte”, se encuentra ubicado en la región amazónica al suroeste del Ecuador, en el sector de la Zarza, parroquia Los Encuentros, en el cantón Yanzatza, provincia de Zamora Chinchipe con coordenadas (x: 776944,2 y: 9583728), sistema de coordenadas UTM WGS 84 Zona 17 S. Ver figura 1.

Figura 1

Mapa de ubicación del área de estudio



Nota. Los relaves usados para este trabajo fueron recolectados de esta zona de estudio, ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe, cantón Yanzatza.

2.2 Materiales

A continuación, se describen los materiales y equipos que se usaron a lo largo del proceso experimental del presente trabajo de titulación.

2.2.1 Relave de mina

Debido a la gran cantidad de residuos que se generan de la explotación minera en la provincia de Zamora Chinchipe, y por las propiedades que presenta este material, se vio factible el uso del relave de mina. Este fue tomado de la concesión minera “Fruta de Norte” operada por la empresa multinacional Lundin Gold Inc., ubicada al suroeste del Ecuador en la provincia de Zamora Chinchipe. El relave filtrado como no filtrado, se almacenó en tanques de almacenamiento grandes para su posterior análisis e implementación (Cardno, 2018).

2.2.2 Sporosarcina pasteurii

El microorganismo “Sporosarcina pasteurii” pasó por una previa adaptación, la cual consiste en replicarlo cada día hasta que a través del conteo microbiano por medio del microscopio marca “ZEISS Primostar 3”. se compruebe que la bacteria está en su fase exponencial de crecimiento y poder emplearlo en la biocementación del relave. Con un mayor número de microorganismos (2×10^8 cel/mL), favorece a una cohesión del material mucho más efectiva (Lluís & Ernest, 2020).

2.2.3 Moldes de acero o hierro

Para la elaboración de las probetas testigo y el formato comercial del ladrillo se necesitaron moldes de acero o hierro de 5x5x5 cm para el caso de los primeros. Los moldes de madera quedaron descartados porque la madera absorbería gran parte de la solución.

Figura 2

Molde de acero 5x5x5 cm

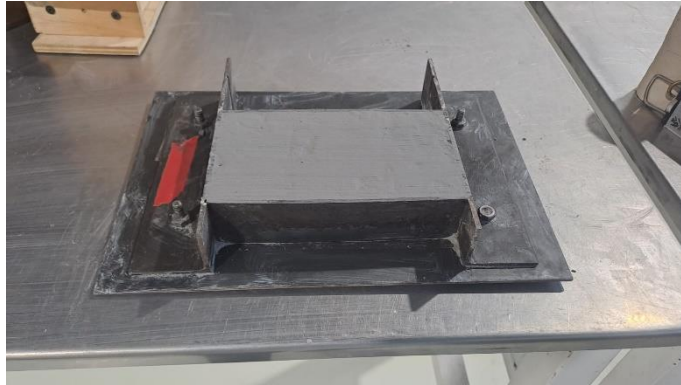


Nota. Moldes de acero de tres cubos de 125 m³ empleado en la realización de probetas testigo.

Y para la elaboración de los ladrillos con el formato comercial, se empleó moldes de hierro de 9x4x16 cm, esta no es la medida estándar de un ladrillo convencional, sin embargo, se lo realizó de esta manera por la falta de materiales, principalmente del molde.

Figura 3

Moldes de hierro 9x4x16 cm



Nota. Molde de hierro para ladrillo de 576 m³ empleado en la realización de los prototipos finales.

2.3 Metodología

La metodología fue experimental, y se realizó en diferentes etapas a lo largo del desarrollo de este. La primera etapa fue la caracterización de la materia prima, en donde, se analizaron parámetros fisicoquímicos y mecánicos del relave para conocer su comportamiento en el proceso de la biocementación.

2.3.1 *Sporosarcina pasteurii*

Para el caso del microorganismo "*Sporosarcina pasteurii*", se replicó cada 24 horas para que produzca una gran cantidad de ureasa y favorezca en la cementación del relave. Este procedimiento se lo realizó en una cámara de flujo laminar marca "ESCO" para evitar la contaminación de la bacteria, de igual manera se realizó un conteo bacteriano, con el uso de una cámara de Neubauer y el microscopio marca "ZEISS Primostar 3", con el fin de comprobar que la bacteria está en su fase exponencial de crecimiento ($2,5 \times 10^8$ cel/mL) y poder emplearlo en la biocementación del relave

2.3.2 *Elaboración de probeta testigo*

Se elaboraron las probetas testigo con una mezcla de relave, agua y cemento para determinar parámetros como la densidad, presión óptima, tiempo de curado, etc. Esto para

conocer en qué condiciones expuestas la probeta lograba una mayor resistencia a la compresión y con esto permita tener un blanco con el cual se puede comparar con el ladrillo resultante del proceso de biocementación.

2.3.3 Elaboración de prototipo de ladrillo

El ladrillo final fue elaborado con una proporción 3:0,5:0,5, es decir, de toda la mezcla llevó tres partes de relave (693,8 g); 0,5 de cemento (115,6 g) y 0,5 parte líquida (115,6 g), la cual fue una mezcla en proporciones iguales de cloruro de calcio marca “Merck Millipore” y microorganismo. Además, fueron elaborados en una prensa a una presión de 2000 PSI, la cual fue la presión óptima con la que las probetas testigos alcanzaron valores más altos de resistencia a la compresión simple y con un curado al aire libre de un tiempo de 28 días.

2.3.4 Caracterización del relave minero

Se caracterizó el relave considerando los ensayos físicos, químicos, mineralógicos y mecánicos para evaluar las propiedades iniciales. Los ensayos realizados fueron: Ensayos Físicos (granulometría, límites de Atterberg, densidad y contenido de humedad), ensayos químicos (potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, determinación de carbonatos, capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables, fluorescencia de rayos X y metales pesados), y ensayos mineralógicos (difracción de rayos X).

Todos los ensayos se realizaron por triplicado y duplicado analíticos para una mejor confiabilidad de los resultados.

A. Ensayos Físicos

- **Límites de Atterberg**

Se realizó el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad : El límite líquido se rigió bajo el método ASTM D 4318, en donde el relave pasó previamente por el tamiz N°40 (425 µm). Se humedeció la muestra, se colocó el suficiente material en el vaso del equipo de casa grande para que, al apretarlo y extenderlo con la espátula y tenga un espesor de 10 mm en el punto máximo espesor. Se trazó una línea recta en el medio con el ranurador y se dieron varios golpes de la cuchara del equipo hasta que las dos mitades se empezaron a unir a lo largo de una distancia de aproximadamente 13 mm, se registró el número de golpes

necesarios para cerrar la esta ranura. Se tomó la muestra cortando el suelo de forma perpendicular a la ranura y se pesó inmediatamente para llevarla a la estufa durante 24 horas.

Pasado este tiempo se pesó nuevamente la muestra, pero ya totalmente seca. Se repitió el mismo proceso según los rangos de número de golpes (15-20, 20-25, 25-30 y 30-35).

El límite plástico se determinó usando la norma ASTM D 4318, en la cual se buscó la humedad más baja con la que puede formarse barritas de relave de 3 a 3.2 mm de diámetro, haciendo rodar la muestra de relave con la palma de la mano en una superficie plana (placa de vidrio esmerilado), tratando que estas no se destruyan. Se pesó la muestra húmeda y se colocó en la estufa de secado, posteriormente se sacó de la estufa y se dejó enfriar para registrar el peso seco.

B. Ensayos Químicos

- **Potencial de Hidrógeno (pH)**

Se desarrolló este parámetro bajo el método ASTM D-4972, se utilizó una relación 1:2.5 (masa/volumen), es decir, se tomó 10 g de relave con 25 mL de agua destilada en un vaso de precipitación. En el equipo de agitación de la marca “GFL” modelo “3018” se dejó las muestras por cinco minutos a 300 rpm. Se procedió con la lectura de pH con el equipo de medición (pHmetro) marca “Mettler Toledo” modelo “S220-Basic” previamente verificado con buffer de 4.0 (Bazan, 2017).

- **Conductividad eléctrica**

Este ensayo se realizó con una relación de 1:2.5 (masa/volumen), agregando 10 g de relave y se mezcló con 25 mL de agua destilada en un vaso de 100 mL. Se dejaron las muestras en el agitador horizontal marca “GFL” modelo 3018 por 30 minutos a 300 rpm, luego se filtraron y leyeron las muestras en el conductímetro marca “Mettler Toledo” modelo “S230-Basic” (Bazán, 2017).

- **Determinación de carbonatos**

Para la determinación de carbonatos se basó en el método de titulación “GLOSOLAN-SOP-05” de la FAO. Con el uso del ácido clorhídrico 1N marca “Merck Millipore” a la muestra

los carbonatos se descomponen y se los determina mediante una retro-titulación con una solución alcalina (hidróxido de sodio 1N marca “Fisher”) para cuantificar el consumo de H⁺ (FAO, 2021).

Con el volumen de viraje que se obtuvo, se empleó la siguiente ecuación que calcula el porcentaje de carbonatos en el relave:

$$CaCO_3 \text{ equivalente (\%)} = \left(\frac{V_{HCl} N_{HCl} - V_{NaOH} N_{NaOH}}{\text{gr de relave}} \right) * 0.05 * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde,

V_{HCl} = Volumen utilizado de solución de HCl (mL)

N_{HCl} = Normalidad de la solución de HCl

V_{NaOH} = Volumen utilizado de solución de NaOH (mL)

N_{NaOH} = Normalidad de la solución de NaOH

- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

Este ensayo se rige bajo el método de saturación de acetato de amonio (C₂H₇NO₂). Se pesó 50 g de relave en un matraz Erlenmeyer, se añadió 40 mL de acetato de amonio marca “Fisher”, y se llevó las muestras en el equipo de agitación marca “GFL” modelo 3018 durante un tiempo de 30 minutos. Posterior a ello, se trasladó a un vaso de precipitado con un embudo y papel filtro, toda la solución que se encuentra en el vaso se lavó con 60 mL adicionales de C₂H₇NO₂. A la solución resultante se realizó la lectura de las bases intercambiables (calcio, sodio y magnesio) en el equipo de absorción atómica marca “Perkin Elmer” modelo “AANALYST 400”.

Al filtro se lavó con 50 mL de alcohol etílico, y esta solución se la desechó. En otro matraz se colocó el embudo con el filtro y se aplicó 100 mL de cloruro de potasio 1N (KCl) marca “Merck”. Esta solución resultante se la destiló en el equipo Kjeldahl marca “Novatech” modelo “KJ6DE”. Para ello se añadió 20 mL de la solución de KCL 1N con 2 mL de hidróxido de sodio 10N (NaOH) marca “Merck” y se destiló por 5 minutos en el equipo destilador Kjeldahl antes mencionado.

La solución obtenida se la ubicó en un vaso con 2 mL de ácido bórico al 2% (H_3BO_3) marca “Merck” y 20µl de indicador mixto (rojo de metilo marca “Merck” y verde de bromocresol marca “Panreac”) (Bazar, 1996). Todo esto se lo tituló con ácido sulfúrico 0.02N (H_2SO_4) marca “Merck”. Mediante la siguiente ecuación se obtuvo el valor del CIC en meq/100 g.

$$CIC \left(\frac{\text{meq}}{100 \text{ gr}} \right) = \frac{N * G * V}{a * \frac{100}{W_t}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde,

N= Normalidad del ácido

V= Volumen de extracción (mL)

a= Alícuota

Wt= Peso de muestra (g)

G= Gasto de volumen del ácido

- **Fluorescencia de rayos X (FRX) y Difracción de rayos X (DRX)**

Para el análisis de estos dos parámetros se procedió a pasar el relave en un tamiz de apertura 200 µm y se lo introdujo en una bolsa de plástico hermética y etiquetadas, para su envío al Laboratorio de geociencias de la Universidad Técnica Particular de Loja. Los resultados obtenidos se los ingresó e interpretó en el software HighScore Plus. Con ellos se identificaron los elementos mayoritarios, elementos minoritarios, Elementos trazas para el caso del FRX y para el DRX la composición mineralógica del relave.

- **Cuantificación de metales**

La cuantificación de metales (Cu, Fe, Ni, Zn y Cd) se realizó en base a la metodología de EPA 3052. En donde, se tomó un peso de 0,5 g del relave en un tubo de digestión, se agregó 9 ml de ácido nítrico (HNO_3) marca “Fisher” con 3 ml de ácido fluorhídrico (HF) marca “Merck” y se dejó reaccionar por 15 minutos. Se colocaron las muestras en el microondas digestor MARS 6 por un tiempo de 60 minutos. Una vez digestadas las muestras se filtraron en balones y se aforaron a 25 ml.

Finalmente, se prepararon estándares para los metales a cuantificar para obtener la curva de calibración y poder realizar la lectura en el equipo de absorción atómica por llama marca “Perkin Elmer” modelo “AAAnalyst400”.

C. Ensayos Mecánicos

- **Compresión Simple**

Se utilizó la norma NTE INEN 0294, donde la resistencia a la compresión simple se encuentra definida como la carga máxima que soporta un material antes del punto límite de fallo o ruptura. Se expresa en unidades de kg/cm². Para este ensayo se tomaron unas probetas testigo, luego se calibró el equipo marca “Shimadzu” modelo “Concreto 2000X” de compresión a utilizar de acuerdo con las medidas de la probeta a ensayar.

Una vez se obtuvo la carga máxima soportada por la probeta se utilizó la ecuación 3 para obtener la resistencia a la compresión simple.

$$\sigma \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = \frac{P}{A} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

Σ = Esfuerzo máximo a compresión simple (kg/cm²)

P= Carga máxima soportada (kg)

A= Área de sección (cm²)

Las normas empleadas para los requisitos mínimos fueron las INEN 297 y 3066, que dictan los requisitos mínimos para ladrillos cerámicos y de concreto respectivamente. Además, clasifican los ladrillos en distintas categorías según su resistencia neta mínima a la compresión simple y según esta se comprueba si es apto para aplicaciones de mampostería estructural (tipo A), no estructural (tipo B) o aliviamientos de losas (tipo C).

- **Resistencia a la flexión**

La norma empleada para este ensayo fue la NTE INEN 295. Esta prueba establece la resistencia a la flexión de los ladrillos cerámicos. El método se basa en la aplicación de una carga progresiva de flexión a una muestra de ladrillos, hasta determinar su resistencia máxima admisible. Primeramente, colocando el ladrillo con su cara mayor sobre los apoyos,

asegurando una separación de 15 cm entre estos. Se hizo descender la pieza superior hasta obtener un contacto directo con la superficie en el centro del ladrillo y se aplicó la carga hasta la rotura de la muestra

- **Ensayo de abrasión**

Para este caso se empleó un método cualitativo por medio de la visualización del desgaste por abrasión que puede tener el ladrillo. Empleando un objeto con cierta rugosidad se procedió a realizar la prueba, pasando este sobre el ladrillo con una fuerza constante de manera lenta y una vez solamente. Se analizó el grado de desgaste que tuvo el ladrillo y mediante una tabla se comprueba el grado de desgaste (muy bajo, bajo, medio, alto o muy alto).

- **Ensayo de resistencia al fuego**

La norma ASTM E119-20, fue la que se aplicó para este ensayo. Su objetivo es evaluar la duración de los materiales de construcción que sufren un incendio, conservan su integridad estructural o exhiben ambas propiedades durante una exposición de prueba predeterminada a un fuego estándar controlado para alcanzar ciertas temperaturas durante un período de tiempo específico.

2.3.5 Pruebas para elaborar el ladrillo

Durante el tiempo de experimentación se realizaron varias experimentaciones de prueba-error hasta dar con el más eficiente y aplicarlo en la elaboración de los ladrillos. En estas pruebas se fueron experimentaron distintas metodologías para la formación de las probetas testigo, concentración de microorganismo (urea), tipo de inoculaciones, alimentación del microorganismo, combinación con otros elementos (cemento), densidad con la que se trabajó, proceso de desmolde, tiempo de curado y método de aplicación del microorganismo al relave. En la figura 4 se muestra a detalle todas las variables de las pruebas experimentales realizadas.

Figura 4

Pruebas para realizar el ladrillo

<p>Tipo de relave</p> <ul style="list-style-type: none"> - Relave filtrado - Relave no filtrado 	<p>Presión de confinamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1000 PSI - 2000 PSI - 3000 PSI 	<p>Fluidez</p> <ul style="list-style-type: none"> - 10 % - 20 % - 30 %
<p>Concentración de microorganismo (urea)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 % - 6 % - 10 % 	<p>Inoculaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Única - Doble 	<p>Alimentación del microorganismo</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 día - 3 días - 5 días
<p>Mezcla cemento-microorganismo</p>	<p>Densidad</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1,7-1,8 g/cm³ 	<p>Proceso de desmolde</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 día - 3 días - 5 días - 14 días - 28 días
<p>Tiempo de curado</p> <ul style="list-style-type: none"> - 7 días - 14 días - 21 días - 28 días 	<p>Tipo de curado</p> <ul style="list-style-type: none"> - En agua - Al aire libre - En cloruro de calcio (CaCl₂) - En caldo nutrient broth 	<p>Aplicación</p> <ul style="list-style-type: none"> - Irrigación - Mezclado

Nota. Las variables mostradas fueron elaboradas para aplicar los óptimos en la elaboración del ladrillo, realizadas como probetas de testigo.

Aspectos importantes como el método de formación de probetas es importante y en este caso se experimentaron con dos maneras. Las elaboradas a presión se probó con distintos valores de presión (1000, 2000 y 3000 PSI), con el fin de conocer cual obtenía una mayor resistencia a la compresión. En el caso de las pruebas elaboradas por fluidez se las realizó a distintos porcentajes de agua (10%, 20% y 30%) y así mismo como el caso anterior, probar cual tiene una mayor resistencia a la compresión. De estas, se tomó la que obtuvo una mejor formación, facilidad al momento de desmoldar, menor pérdida de material y la que alcanzó mayor resistencia a la compresión.

Estas mismas se dejaron a distintos tiempos de curado (7,14, 21 y 28 días), como en diferentes tipos de curado (agua, aire libre, cloruro de calcio y caldo nutrient broth), con el fin de conocer cuál es la óptima para aplicarlo en el prototipo del ladrillo.

2.3.6 Cálculo de la huella de carbono

Para el cálculo de este valor se describieron todos los procesos que engloba la elaboración de estos ladrillos, maquinaria, equipos, además de la cuantificación de los insumos que se usaron. También incluyen las fuentes de emisión de gases, se categorizaron los aspectos ambientales asociados, se establecieron los factores de emisión y el potencial de calentamiento global de los gases asociados (Carranza, 2023). Por lo que durante todo el proceso de elaboración se midió toda la energía utilizada para la elaboración del prototipo, para después mediante la siguiente fórmula se calculó la huella de carbono:

$$\text{kgCO}_2\text{eq} = \text{Fe} * \text{A} \quad (\text{Ecuación 4})$$

4)

Donde,

kgCO₂eq= Huella de carbono

Fe= Factor de emisión

A= Actividad

El factor de emisión (Fe) se lo consiguió de bases de datos de agencias medioambientales como la británica BEIS (Factores de conversión del gobierno británico), y en organismos independientes como el IPPC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) (ClimatePartner GmbH, 2023).

Para este caso se emplearon factores de emisión de los distintos insumos e equipos que se emplearon para la activación y crecimiento del microorganismo, así como todos los materiales que se usaron en la mezcla final del ladrillo. Estos fueron encontrados dentro de la base de datos de la IPPC (2014) y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Factores de emisión de los insumos del ladrillo biocementado

Insumo	Factor de emisión (Kg CO ₂ eq /kg)	Fuente
Producción de urea	0,2	(IPPC, 2014)
Cloruro de calcio	0,44	(IPPC, 2014)

Cemento	0,52	(IPPC, 2014)
Caldo nutritivo	0,105	(IPPC, 2014)
Relave	0,0078	(IPPC, 2014)

Nota. Se muestran los factores de emisión para cada insumo empleado en la fabricación del ladrillo biocementado para el cálculo de la huella de carbono.

Para el valor de la actividad se consideró el peso del ladrillo elaborado que es aproximadamente de 0,835 kg y para la mezcla de este se usó 0,6938 kg de relave, 0,1156 kg de cemento, 0,0578 kg de microorganismo (urea y caldo nutritivo nutrient broth) y cloruro de calcio (CaCl₂).

Por otro lado, para el cálculo de la huella de carbono del ladrillo convencional se consideraron insumos como el consumo de leña como combustible con un factor de emisión de 1,84 Kg CO₂eq / kg y el de la extracción de la arcilla con maquinaria (retroexcavadora a diésel), la cual tiene un factor de 2,61 Kg CO₂eq / L (IIPC, 2014).

Al igual que el ladrillo biocementados se consideró un peso de 0,850 kg por cada uno y en la mezcla con un 0,8098 kg de arcilla preparada, 0,1156 kg de agua y considerando que por cada ladrillo cocido se queman 0,77 kg de leña (Chojolan, 2016). Para el caso de la retroexcavadora se tomó como referencia la de la marca "Case" modelo "580N", la cual es a diésel y de bajo consumo (15 litros de diésel/ hora), este tipo de maquinaria logra extraer 30,56 kg de arcilla por hora, teniendo un consumo 0,03 litros por cada kg extraído de material.

Capítulo tres

Resultados

Se presentan los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica de la zona de estudio y de la evaluación del ladrillo obtenido a partir de la biocementación de relaves mineros, representando por tablas y figuras que permiten interpretar, analizar y comparar posteriormente con resultados de otros estudios similares de distintas fuentes bibliográficas.

3.1 Caracterización fisicoquímica

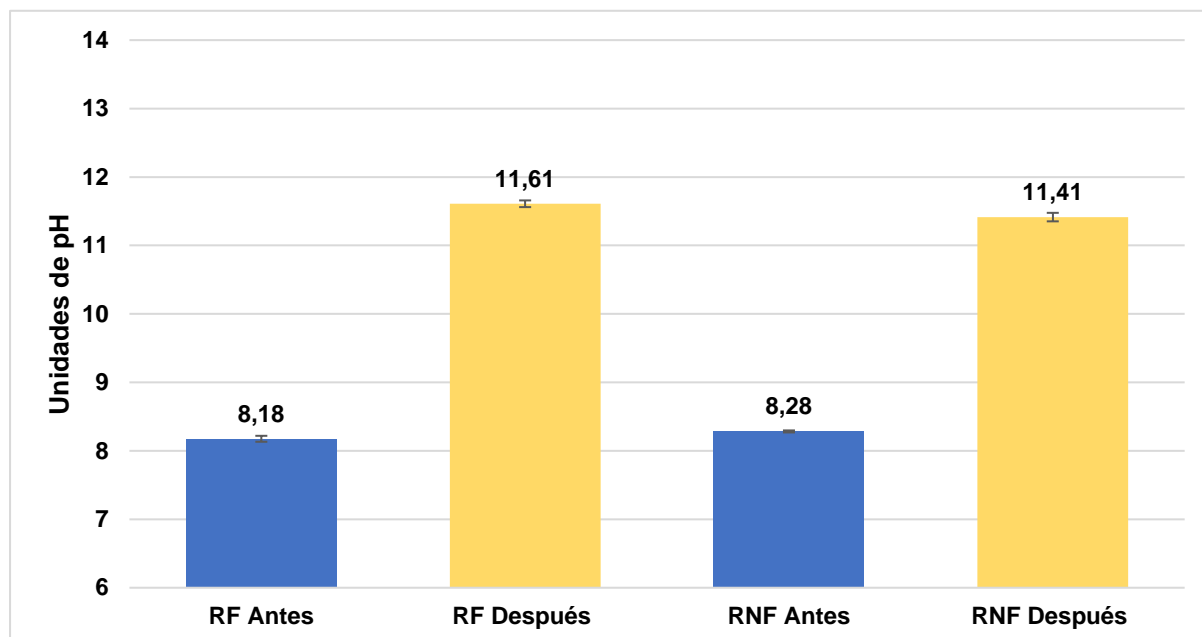
La caracterización fisicoquímica del relave permite conocer cómo se encuentra compuesto inicialmente. Esto se lo realizó con la intención de obtener datos iniciales que permitan tener una comparación una vez aplicado el proceso de biocementación.

3.1.1 *Potencial de hidrógeno*

La figura 5 indica el pH que obtuvo el relave antes y después de la aplicación de la biocementación, presentado inicialmente con un pH ligeramente básico (8,18) y después del proceso, este aumentó a un valor más alcalino (11,61) en promedio para ambos tipos de relaves. Este aumento se debe a la hidrólisis de la urea que lleva a cabo el microorganismo, donde se generan subproductos como el amoníaco (NH_3) y carbonato (CO_3^{2-}), aumentando el pH y convirtiéndolo a un medio alcalino que favorece la precipitación de carbonato de calcio (Dhami et al., 2013).

Figura 5

Datos de potencial de hidrógeno (pH)



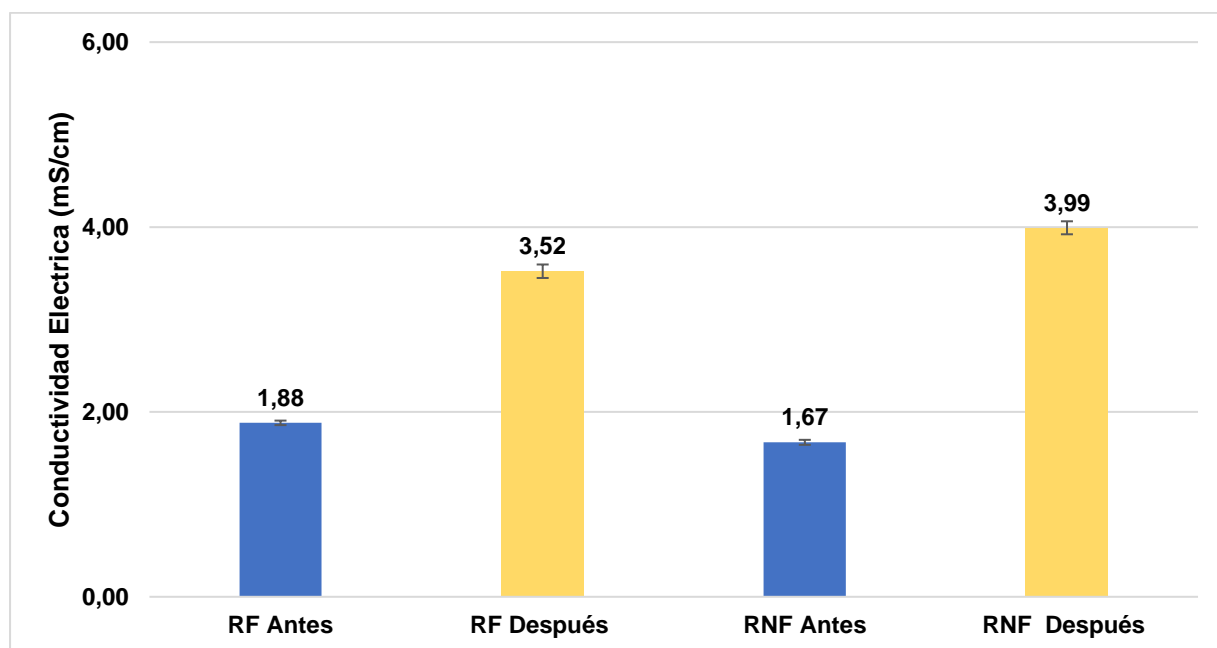
Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado, RNF= Relave No Filtrado.

3.1.2 Conductividad Eléctrica

Los resultados del análisis de conductividad eléctrica se muestran en la figura 6, en el cual inicialmente se obtuvo un resultado promedio de 1,88 mS/cm para el relave filtrado y 1,67 mS/cm para el relave no filtrado, después de la biocementación este aumentó en ambos casos de a un valor de 3,75 mS/cm. Este crecimiento se debe al aumento de la concentración de iones libres del medio durante la precipitación de calcita inducida microbiológicamente (MICP), es decir, el microorganismo descompone la urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) en amoníaco (NH_3) y dióxido de carbono (CO_2) y genera iones como NH_4^+ y OH^- , aumentando la conductividad eléctrica (Qabany & Soga, 2013).

Figura 6

Datos de conductividad eléctrica



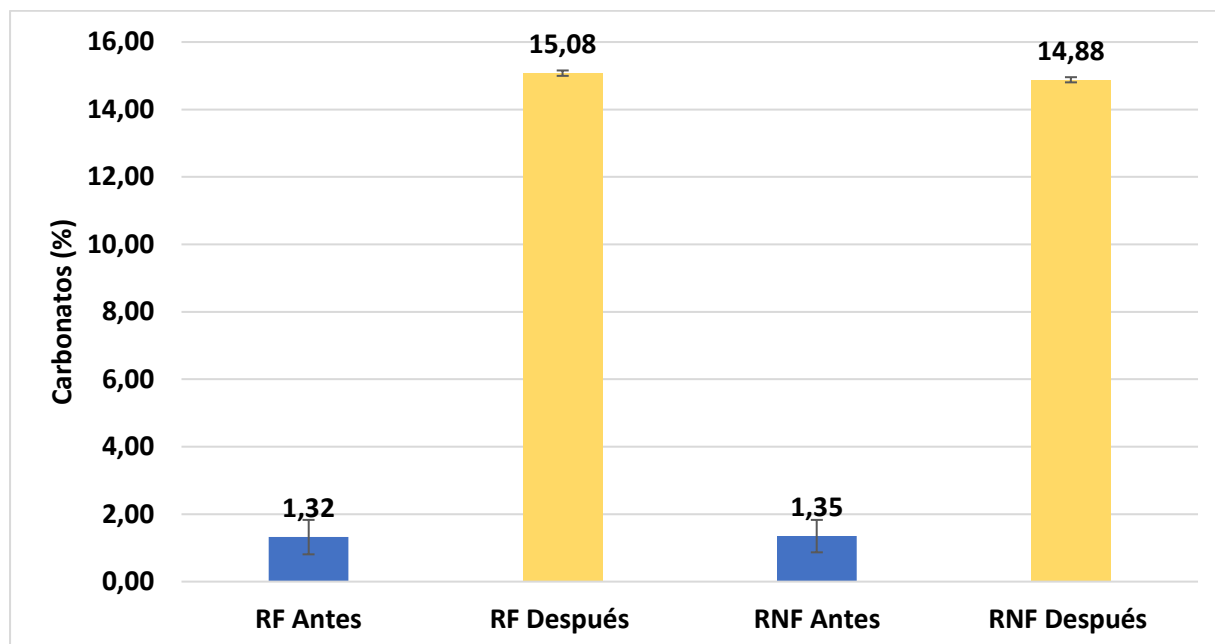
Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado ; RNF= Relave No Filtrado.

3.1.3 Carbonatos

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos del porcentaje de carbonatos de ambos relaves, donde inicialmente se obtuvo un promedio de 1,30% de carbonatos y posterior al proceso de biocementación llegó a un 15% aproximadamente para ambos relaves. Un aumento en el porcentaje que tiene sentido, puesto a que, con la precipitación de carbonato de calcio, el porcentaje de carbonatos presentes en el medio aumenta, siendo un parámetro de verificación del correcto funcionamiento de la biocementación (Achal et al., 2010).

Figura 7

Datos de porcentaje de carbonatos



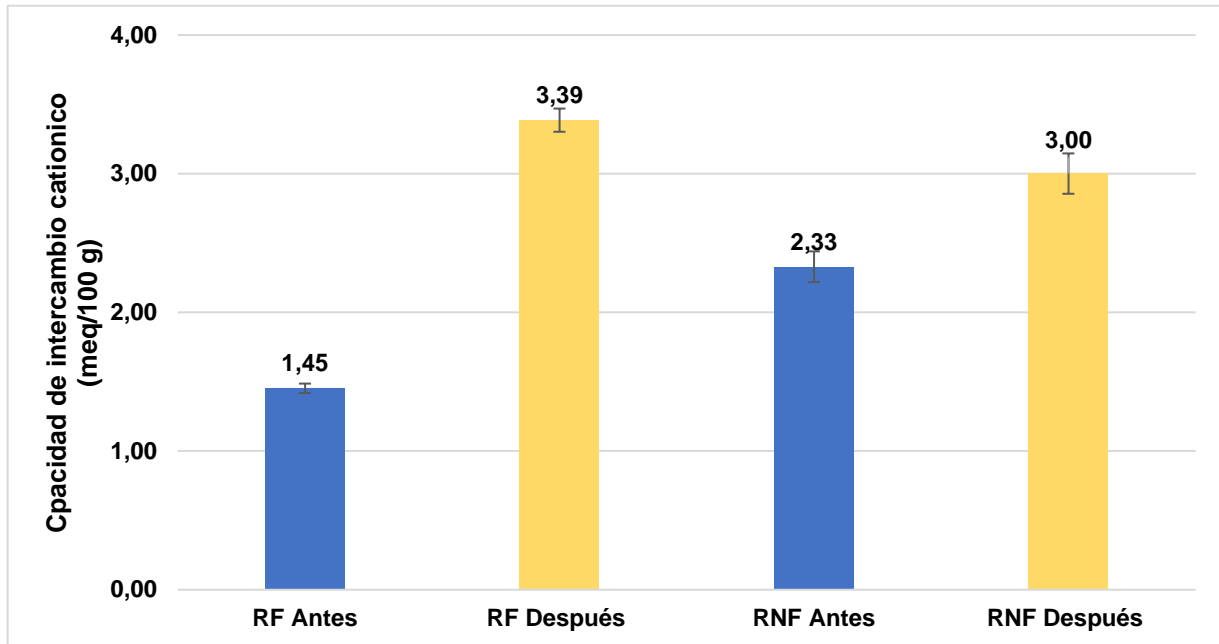
Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado; RNF= Relave No Filtrado.

3.1.4 Capacidad de intercambio catiónico

En la figura 8 se puede observar los resultados obtenidos de la capacidad de intercambio catiónico de ambos relaves, antes y después de la aplicación del proceso de biocementación. Obteniendo inicialmente un valor promedio de 1,453 meq/100 g para el relave filtrado y 2,329 meq/100 g para el no filtrado, posterior al proceso se obtuvo valores de 5,269 y 3,001 meq/100 g respectivamente, teniendo un aumento de esto en ambos casos. Un cambio que hace referencia a la formación de nuevos sitios activos para retener cationes con la formación del carbonato de calcio y silicatos de calcio hidratados. Además, en un medio alcalino existe una mayor estabilidad de los cationes adsorbidos, contribuyendo al aumento del CIC (Ortega & Mercedes, 2022).

Figura 8

Datos de capacidad de intercambio catiónico



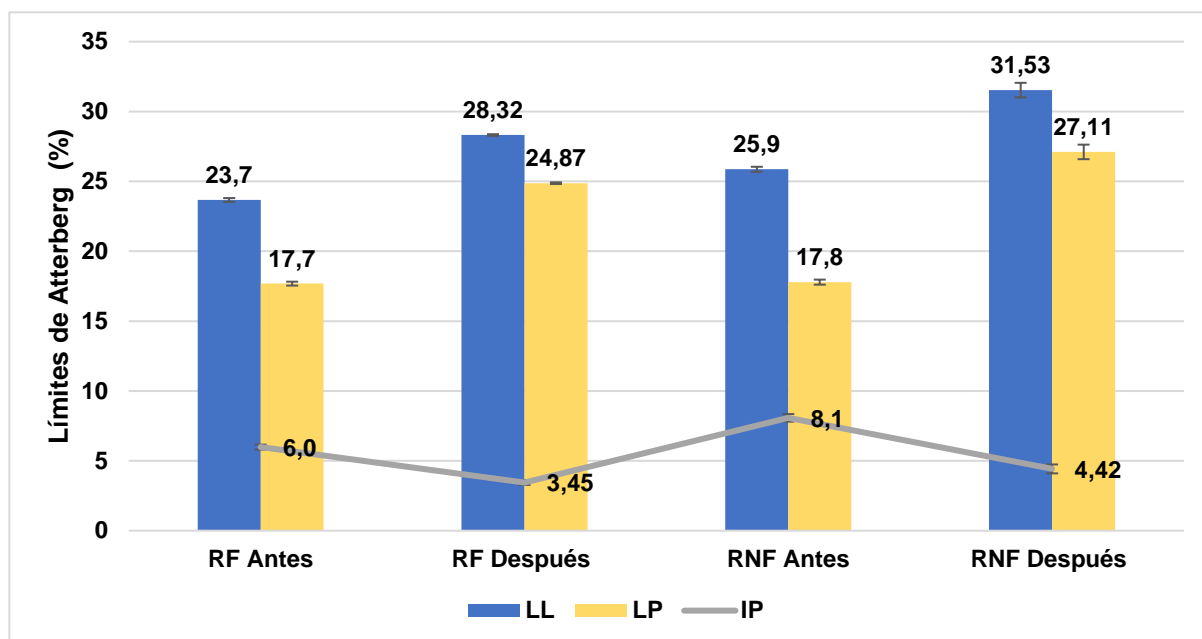
Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado; RNF= Relave No Filtrado.

3.1.5 Límites de Atterberg

En la figura 9 se muestran los límites líquidos, plásticos e índice de plasticidad de los dos tipos de relaves, teniendo una disminución de este último pasando de 6% a 3,45% para el relave filtrado y de 8,1% a 4,42% para el relave no filtrado. Resultando en un suelo que se comporta como un limo de baja plasticidad según su clasificación en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y con un potencial de expansión bajo, a consecuencia del aumento de la rigidez y cohesión del relave, debido a la precipitación de carbonato de calcio y la adición del cemento, lo que reduce la capacidad de deformación y sea menos plástico (Mujah et al., 2016).

Figura 9

Datos de límites de Atterberg



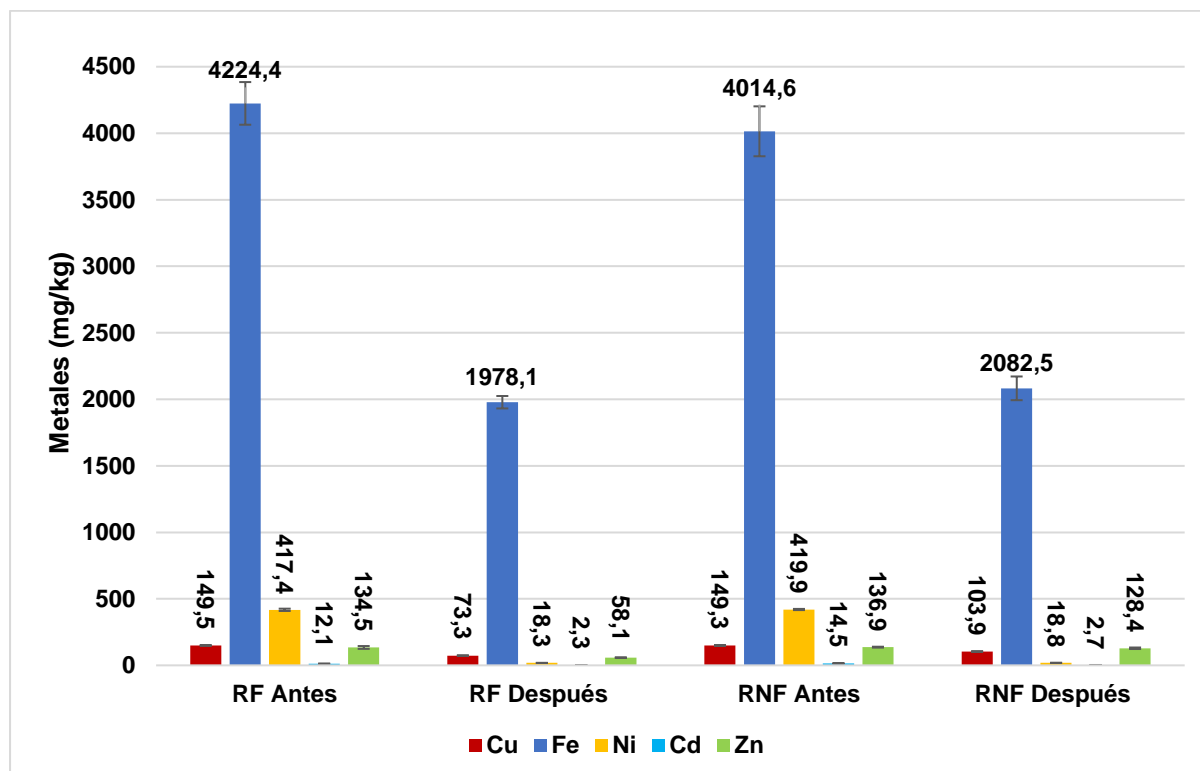
Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado ; RNF= Relave No Filtrado.

3.1.6 Metales pesados

En la figura 10 se presentan los resultados obtenidos de la concentración de metales pesados presentes en el material empleado para la elaboración de los ladrillos del presente trabajo, de los cuales fueron analizados metales como el hierro (Fe), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Zinc (Zn) y Cadmio (Cd). Mostrando un mayor contenido de hierro en ambos tipos de relave y luego de la biocementación este como los demás metales disminuyeron, debido a que el microorganismo no solo puede precipitar carbonato de calcio, sino, que también tiene la capacidad de precipitar metales pesados, formando compuestos insolubles como carbonatos metálicos y reduce la concentración de metales pesados del medio (Li et al., 2022).

Figura 10

Datos de la cuantificación de metales



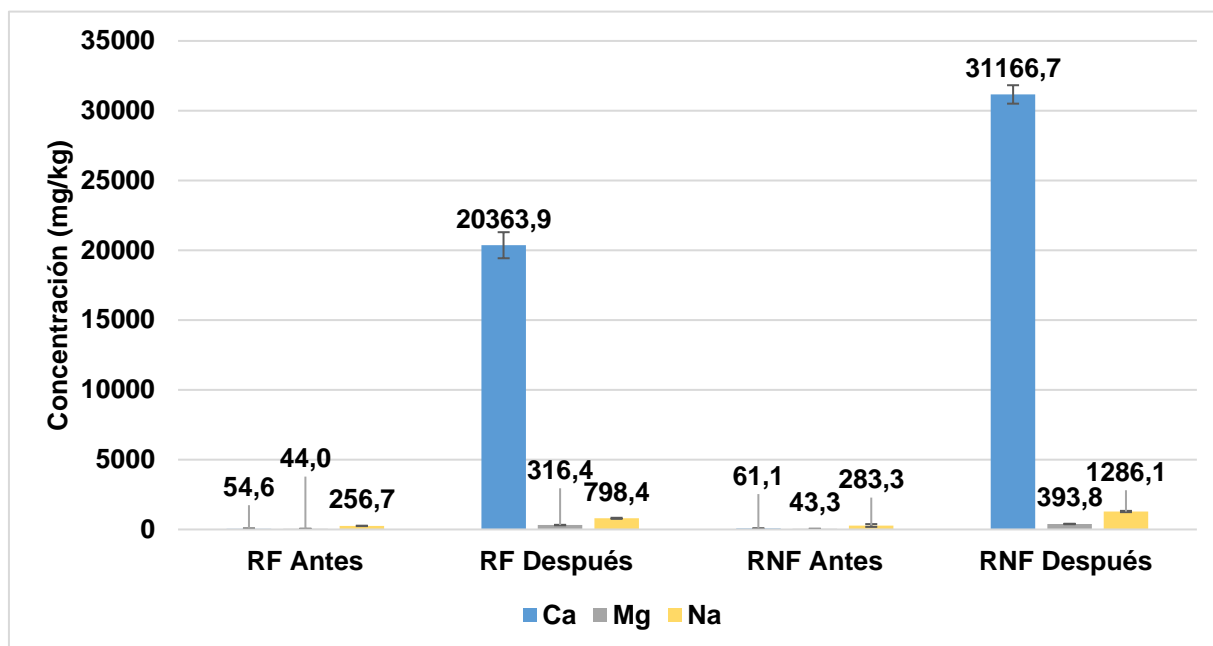
Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado ; RNF= Relave No Filtrado.

3.1.7 Bases intercambiables

Las bases intercambiables cuantificadas fueron el Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Sodio (Na), obtenidas del ensayo de capacidad de intercambio catiónico en la primera filtración. Los resultados se muestran en la figura 11, donde se puede observar el cambio en la concentración de estos antes y post el proceso de biocementación. Evidenciando un aumento de calcio debido a la precipitación de carbonato inducida por microbios (MICP), la adición del cemento y de cloruro de calcio a la mezcla del ladrillo como fuente de calcio, hace que su concentración en el medio aumente (Achal et al., 2010).

Figura 11

Datos de cuantificación de bases intercambiables



Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado ; RNF= Relave No Filtrado.

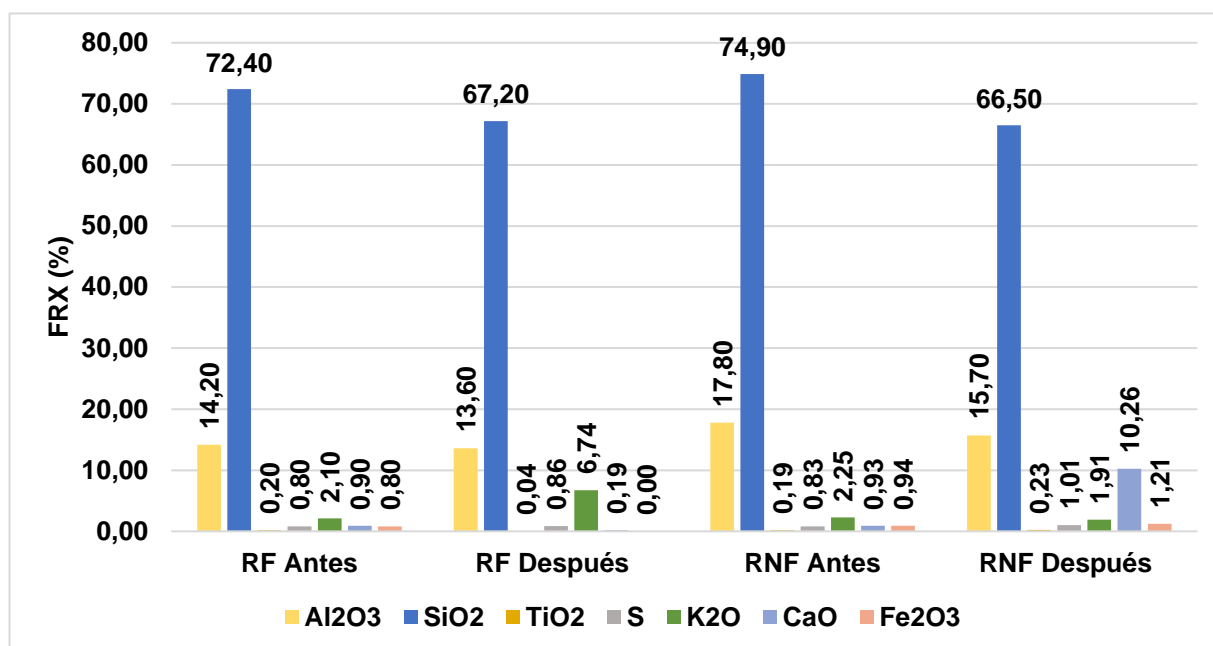
3.1.8 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se presentan los resultados de la composición química de las muestras analizadas, determinada por fluorescencia de rayos X. En la figura 14 se muestran los elementos mayoritarios y minoritarios por el método Mining Light Elements y en la figura 15 está por otra parte, el método Soil FP que determina los elementos minoritarios y trazas. El óxido de silicio-silicato (SiO_2) es el elemento mayoritario en todas las muestras, concordando con los datos obtenidos en el DRX.

Además, se evidencia una disminución del óxido de calcio, pasando de un 0,85% a 0,19% para el caso del relave filtrado y un aumento de 0,93% a 10,26% en el relave no filtrado, lo que quiere decir que en el caso del primero hubo una reacción más completa que el otro, es decir, el óxido de calcio (CaO) se convirtió en otros compuestos como puede ser el carbonato de calcio (CaCO_3). Otros atributos a esto es que en el caso del relave filtrado hubo un tiempo de reacción adecuado para completar las reacciones, mezcla uniforme y una temperatura adecuada (Kemperl & Maček, 2009).

Figura 12

Datos de fluorescencia de rayos X (método Mining Light Elements)

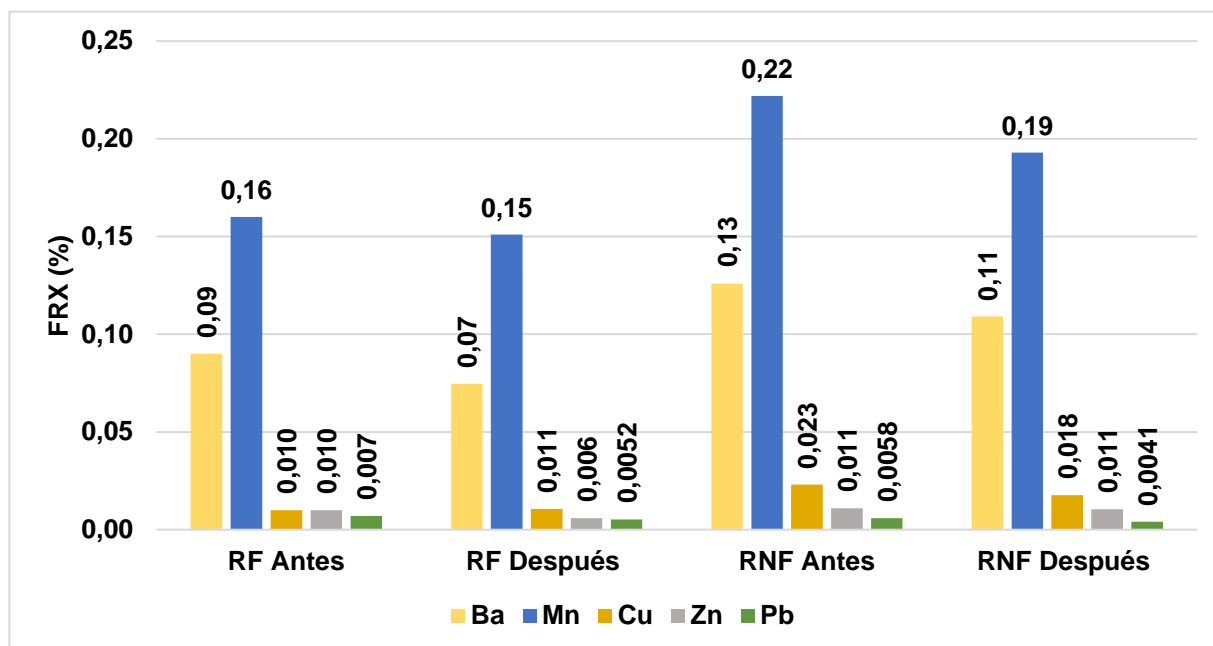


Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado ; RNF= Relave No Filtrado.

En la figura 15 se da algo interesante con la disminución de los metales que se leyeron (Ba, Mn, Cu, Zn y Pb), debiéndose a la capacidad del microorganismo de precipitar metales por la elevada concentración de iones carbonato, sumado con un medio con pH alcalina hace que ocurra esta precipitación de metales con la formación de carbonatos metálicos (Li et al., 2022).

Figura 13

Datos de fluorescencia de rayos X (método Soil FP)



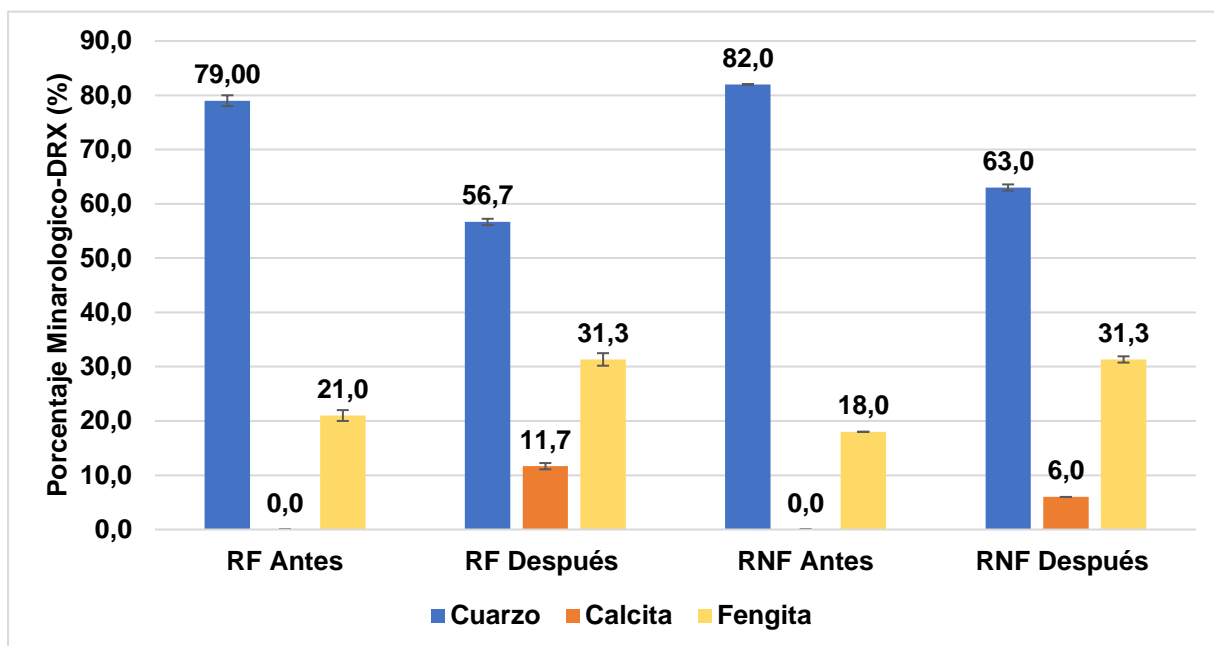
Nota. Se presentan los datos de fluorescencia de rayos X obtenidos y su comportamiento con el proceso de biocementación. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado ; RNF= Relave No Filtrado.

3.1.9 Difracción de rayos X (DRX)

En la figura 13 se evidencian los resultados resultantes del procesamiento y análisis mediante el software HighScore Plus, con el fin de determinar el porcentaje mineralógico que contenía el material (Relave) antes y después del proceso de biocementación. El mineral con mayor presencia corresponde al cuarzo (SiO_2) para ambos tipos de relave, así como antes y después del proceso aplicado para la elaboración de los ladrillos. Un cambio importante es el aumento de la calcita (CaCO_3) por medio de la MICP, asegurando la cohesión de las partículas del relave con su precipitación.

Figura 14

Datos difracción de rayos X



Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado; RNF= Relave No Filtrado.

3.2 Caracterización mecánica

3.2.1 Compresión simple

En la figura 16 se muestra los resultados obtenidos de la compresión simple del ladrillo elaborado a partir de la biocementación y la adición de una cantidad mínima de cemento para su mejora de esta propiedad mecánica, alcanzando presiones de 15,76 MPa para el caso del relave filtrado y 12,53 MPa para el relave no filtrado respectivamente.

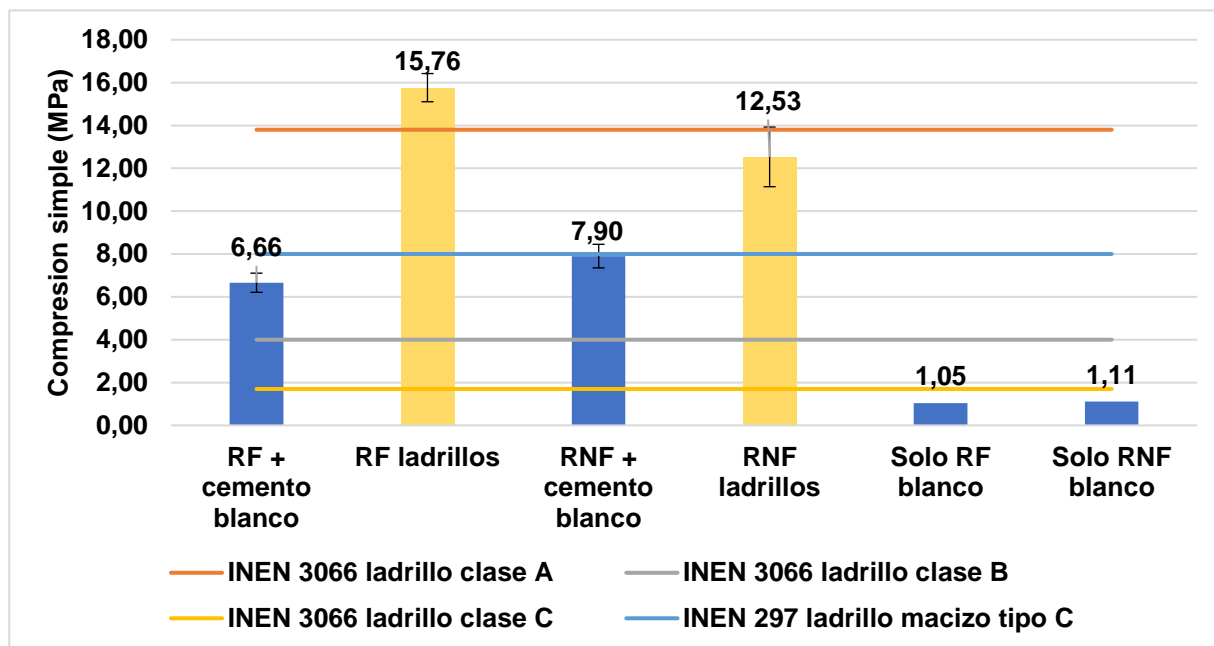
Con relación a los blancos se evidencia un incremento considerable en ambos casos, comprobando el funcionamiento del microorganismo combinado con el cemento y de acuerdo con la norma INEN 3066 el ladrillo con relave filtrado entra en la clase A, es decir, es apto para mampostería estructural, en el caso del ladrillo con relave no filtrado no entra a esta clase por poco y baja a la clase B, de mampostería no estructural.

Para la INEN 297 a ambos se los consideró como un ladrillo macizo clase C por ser fabricado a mano y tener imperfecciones en sus caras exteriores según esta norma. Los ladrillos de este tipo tienen un requisito de resistencia mínima a la compresión simple (8 MPa) y en este caso ambos ladrillos están por encima del valor requerido.

Este ensayo es uno de los más importantes al momento de comprobar si un material es apto para su aplicación en la construcción y en este caso las resistencias son muy aceptables, pudiendo competir con otros tipos de ladrillos en el mercado con la diferencia que este es elaborado de una manera más sustentable al resto.

Figura 15

Datos de resistencia a la compresión simple



Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado ; RNF= Relave No Filtrado. Según la INEN 3066 clasifica a los ladrillos para la clase A= mampostería estructural, clase B= mampostería no estructural y clase C= alivianamientos en losas. La INEN 297 describe al ladrillo macizo tipo C como los fabricados a mano y contener imperfecciones en sus caras exteriores.

3.2.2 Resistencia a la flexión

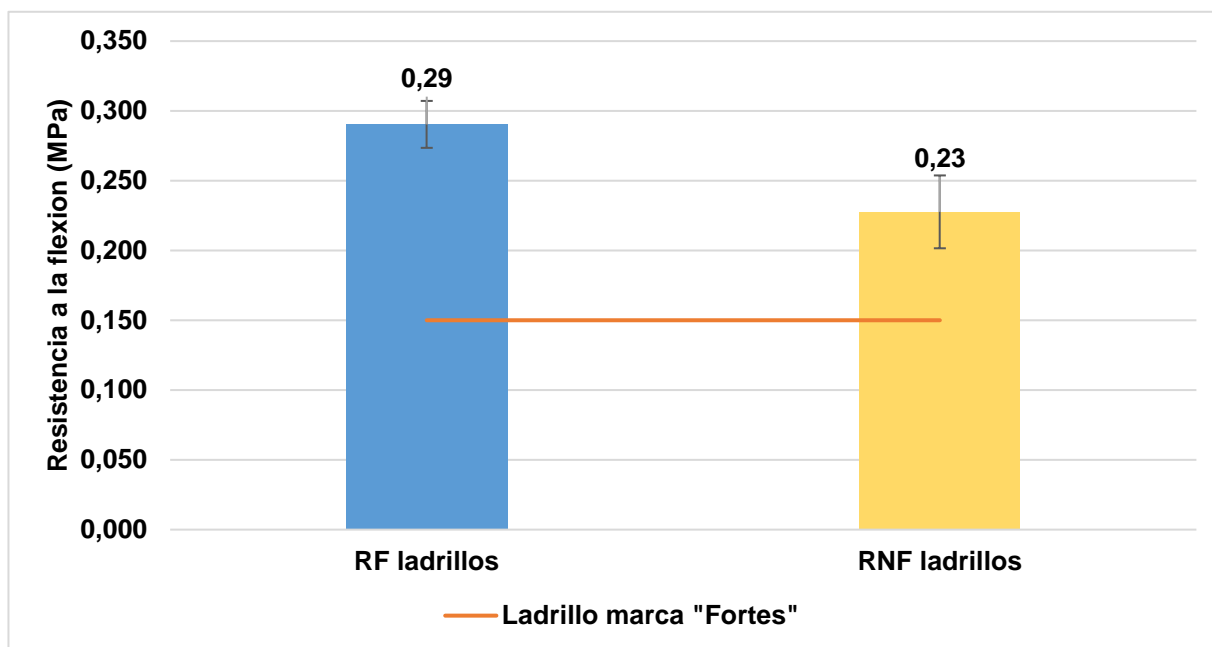
La resistencia a la flexión, siendo la capacidad máxima de un material para resistir fuerzas que tratan de doblarlo o deformarlo hasta su fractura. En la figura 17 se observan los resultados obtenidos de este ensayo para los ladrillos elaborados con el relave filtrado y no filtrado, teniendo en promedio para el primero una resistencia de 0.29 MPa y el segundo con un valor de 0.23 MPa.

Comparando con un ladrillo de características similares como los de la empresa “Fortes” provenientes de Perú, muestran una resistencia a la flexión de 0,15 MPa. Se observa

una mejora en los ladrillos elaborado a partir de la biocementación de relaves en un 43% aproximadamente.

Figura 16

Datos de resistencia a la flexión



Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado ; RNF= Relave No Filtrado.

3.2.3 Resistencia al fuego

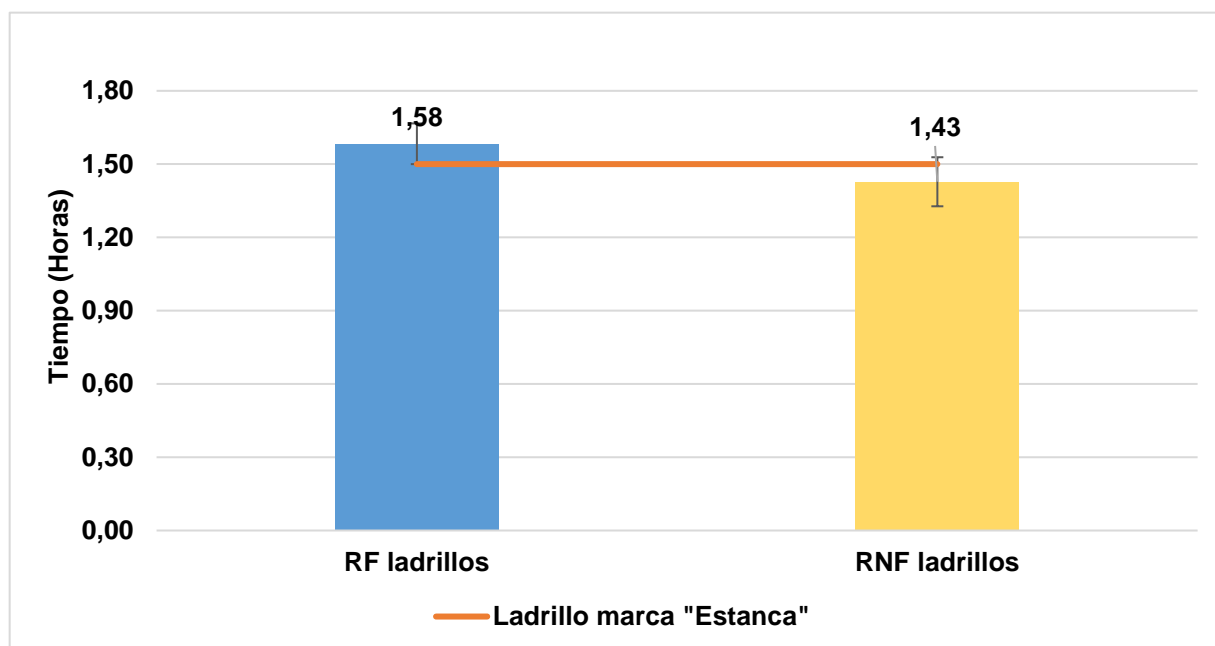
La resistencia al fuego otorga una visión de la capacidad de un material para soportar la exposición al fuego durante un periodo de tiempo sin perder sus propiedades estructurales o funcionales, es decir, hasta que llegue la ruptura de este. En la figura 18 se observan los resultados obtenidos de esta prueba, teniendo tiempos promedio aproximados de 1,58 Horas para el caso del relave filtrado y de 1,43 Horas para el relave no filtrado respectivamente.

Comparando este valor con un ladrillo de la empresa española “Cerámica de la Estanca”, el cual es un ladrillo cerámico del mismo espesor (40 mm) que el ladrillo elaborado con la biocementación de relaves y cuenta con una resistencia al fuego de un tiempo de 1,5 horas o 90 minutos, obteniendo valores similares a los prototipos experimentados.

Con este resultado se comprueba la alta capacidad que tienen estos ladrillos para entrar al mercado y ser aplicado para construcciones sostenibles.

Figura 17

Datos de la resistencia al fuego



Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado ; RNF= Relave No Filtrado.

3.2.4 Ensayo de abrasión

El ensayo de abrasión empleado para evaluar la resistencia de un material de construcción al desgaste, con el fin de determinar su durabilidad en condiciones de uso con superficies rugosas. En este caso se lo realizó de manera cualitativa y los resultados se muestran en la tabla 3, teniendo en promedio un grado de desgaste de muy bajo a bajo que se lo puede observar con claridad en el apéndice I.

Al emplear la combinación del microorganismo con el cemento, se evidencia la óptima cohesión de las partículas del relave, formando una estructura sólida y difícil de desprender sus partículas. Convirtiéndolo en un material óptimo para zonas que tengan contacto directo con materiales abrasivos.

Tabla 3

Datos de resistencia a la abrasión

Muestra	Grado de desgaste
Relave Filtrado	Muy baja-baja
Relave No filtrado	Baja

Nota. Los datos promedio corresponden a los valores medios triplicados \pm DE (n=6). RF= Relave Filtrado; RNF= Relave No Filtrado.

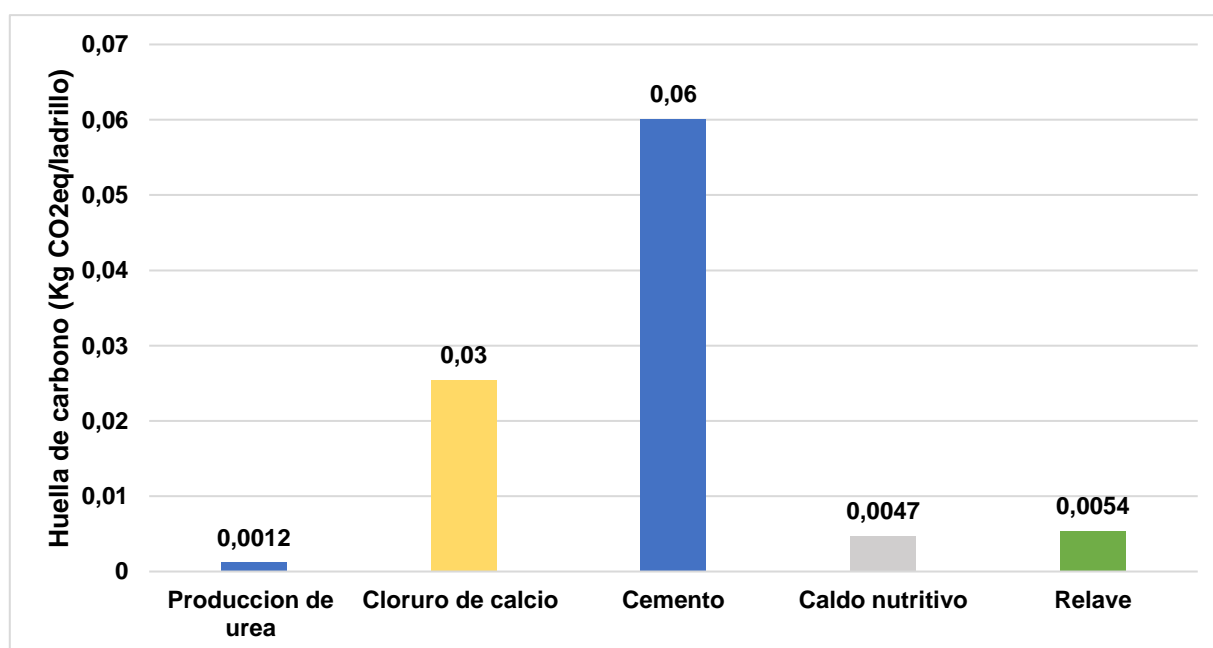
3.3 Huella de carbono

Para el cálculo de la huella de carbono de los ladrillos elaborados a partir de la biocementación de relaves mineros se implementó la fórmula de la huella de carbono (ecuación 4), considerando todos los insumos empleados para la elaboración de este como la urea, cloruro de calcio, relave, cemento y el microorganismo, con sus factores de emisión estimados. En la figura 19 se muestran la cantidad de CO₂ emitido por cada uno de estos, dando un total de 0,01 Kg CO₂eq aproximadamente por cada ladrillo elaborado.

En la figura 20 se muestran los valores obtenidos del cálculo de la huella de carbono de un ladrillo convencional, obteniendo un total de 0,22 kg CO₂eq por cada ladrillo cocido, siendo mucho más alta con relación al anterior (ver figura 20), debido principalmente por la alta emisión de gases por parte del horno a leña específicamente, pues si vemos su factor de emisión dado por la IPCC se evidencia esto con una emisión de 1,84 kg de CO₂eq por cada un kg de ladrillos, es decir, genera más de lo que consume y por esta razón la fabricación de ladrillos con estos hornos es la más contaminante del planeta (Hermosilla, 2014).

Figura 18

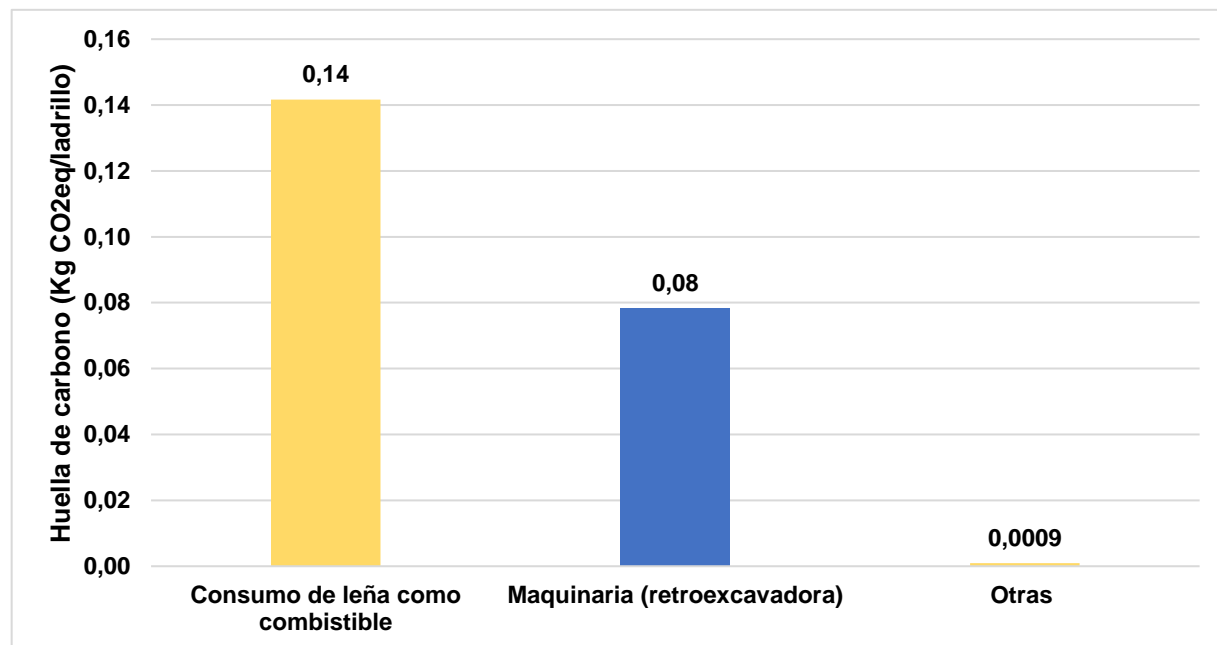
Aporte del ladrillo biocementado



Nota. Se presentan los datos del cálculo de la huella de carbono de los ladrillos biocementados, tomando en consideración los insumos empleados para la elaboración de este.

Figura 19

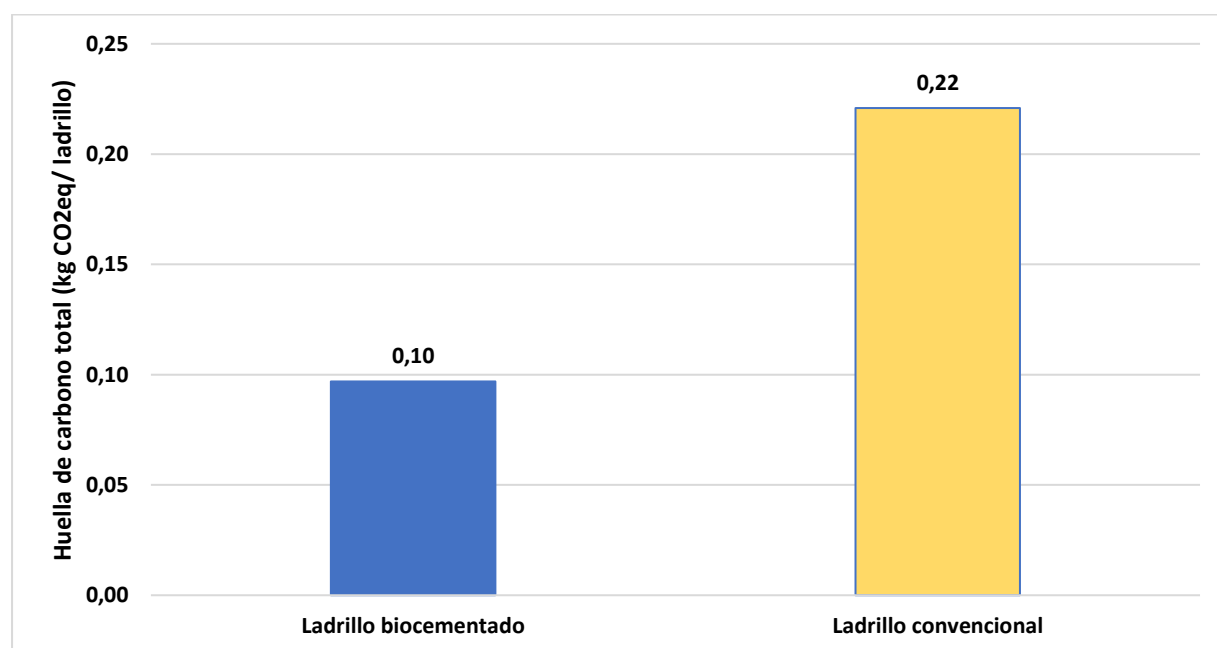
Aporte del ladrillo convencional



Nota. Se presentan los datos del cálculo de la huella de carbono de los ladrillos convencionales, tomando en consideración los insumos empleados para la elaboración de este.

Figura 20

Huella de carbono total del ladrillo biocementado vs el convencional



Nota. Se presentan los datos de huella de carbono total calculado con la suma de todos los aportes de ambos tipos de ladrillos.

3.4 Discusión

En vista a los resultados obtenidos en la parte experimental, se vieron resultados favorables para la biocementación de relaves mineros con el empleo del microorganismo *Sporosarcina pasteurii*, mismo que en otros estudios que fue aplicado mostró resultados positivos en bioestabilización de suelos y como cementante natural (Mahabub et al., 2023).

La bacteria al realizar su proceso enzimático necesita de un aporte de urea para que pueda realizar la hidrólisis de este catalizada por la ureasa y produzca otros subproductos como el amoníaco y carbonato, lo que resulta con un aumento del pH como se muestra en la figura 5. Khoshtinat (2023) menciona que el pH tiende a pasar a un nivel alcalino debido a esta generación de amoníaco por el proceso de la hidrólisis realizada por el microorganismo, creando un ambiente alcalino que favorece la precipitación de carbonato de calcio, mejorando las propiedades del material y permitiendo la aplicación en construcciones sostenibles.

Estudios como los de Okwadha y Li (2010) indican que los microorganismos aerolíticos en presencia de urea aumentan el pH del entorno a aproximadamente 9,25, que es el pH óptimo para el crecimiento de *Sporosarcina pasteurii*. Otras investigaciones como las de Lai et al., (2022) También tuvieron un aumento de pH, en este caso paso de 3,8 a 7,1, haciendo que la condición de pH ideal para el crecimiento óptimo del microorganismo este en un rango de 7 y 9,5 (Tang et al., 2020).

Por otro lado, otro parámetro de control es la conductividad eléctrica que en este caso tendió a aumentar como se observa en la figura 6. Según estudios como los de Sarmast et al. (2014) mencionan que durante el proceso de biocementación con *Sporosarcina pasteurii* y con la formación de carbonato de calcio (CaCO_3), el cual por estos procesos bioquímicos genera mayor concentración de iones disponibles en el medio y con ello el aumento de la conductividad eléctrica. Siendo un indicador clave para el correcto progreso de la biocementación del relave.

Otro parámetro fundamental es la cantidad de carbonatos que después de la biocementación, aumentaron en ambos casos como se evidencia en la figura 7. Comprobando de cierta manera un estudio realizado por Chen et al. (2023), donde mencionan que, en condiciones ideales, hasta un 90% de los iones de calcio proporcionados pueden ser transformados en carbonato de calcio sólido, aumentando su cantidad de carbonatos como la mejora de sus propiedades de densidad y resistencia de materiales tratados.

Sin embargo, si existe un exceso de carbonatos puede generar problemas como la formación de cristales más grandes que interfieren con la matriz ambiental del material, reduciendo su integridad estructural y aumentando la posibilidad de fisuración o también el taponamiento de poros del material, afectando directamente a la permeabilidad de este (Harris et al., 2016).

El CIC siendo la capacidad de retener y liberar cationes de minerales y componentes orgánicos (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas). Un suelo con mayor contenido de materia orgánica o arcillas como montmorillonita presentan un CIC más bajo, mientras que suelos limosos tienen un mayor CIC (Warino, 2024). Para este caso, se obtuvo un aumento del CIC post la biocementación como se muestra en la figura 8, pasando de un valor promedio de 1,45 meq/100 g a 3.4 meq/100 g en el caso del relave filtrado y de 2.3 meq/100 g a 3 meq/100 g en el relave no filtrado.

Los límites de Atterberg son fundamentales para conocer las condiciones iniciales de un suelo o material. Siendo el índice de plasticidad (IP) resultante de la resta del límite líquido (LL) con el límite plástico (LP), el que muestra cuan sensible es el comportamiento mecánico del material en estudio a posibles cambios de humedad o el contenido de humedad para que le suelo se mantenga plástico (Hernández et al., 2019).

En la figura 9 se muestran los resultados de los límites de Atterberg de la caracterización inicial y después del proceso de biocementación, los cuales indican una baja plasticidad y como menciona Lee et al., (2013) que durante la biocementación y la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3), rellena los espacios porosos del material y une las partículas entre sí, haciendo que esto reduzca la capacidad del suelo para absorber agua,

disminuyendo su plasticidad, además si a esto se le añade una pequeña cantidad de cemento, refuerza esta estructura creando una matriz más rígida y menos susceptible a la deformación plástica.

La cuantificación de metales tiene un rol fundamental en la degradación de la sustancia microbiana. Peralta et al., (2023) menciona que los metales pesados (Cu, Fe, Ni, Zn y Cd) pueden inhibir la actividad de las enzimas bacterianas, como la ureasa, la cual es de suma importancia para la descomposición de la urea y la liberación de iones carbonato (CO_3^{2-}) que posteriormente precipita el calcio. En la figura 10 se muestra la concentración de cada uno de estos metales, siendo el hierro (Fe) el que se encuentra en mayor concentración para ambos casos de relave, así como para el antes y después del proceso de biocementación. El alto contenido de este metal en el material disminuye el crecimiento del microorganismo *Sporosarcina Pasteurii* (Lázaro, 2015).

Por otro lado, con la disminución de este metal como de los demás (Cu, Ni, Zn y Cd) se evidencia que el microorganismo no solo tiene la capacidad de precipitar carbonato de calcio, sino, también de inmovilizar estos metales pesados reduciendo su concentración en el relave, pudiendo ser empleado para remediación de zonas afectadas (Chalco, 2022). Existen estudios como los de Liu Peng et al., (2021), donde emplea la *Sporosarcina Pasteurii* como método de biorremediación de suelos contaminados con plomo (Pb), zinc (Zn) y cadmio (Cd) y observó una reducción importante de las concentraciones de lixiviación de metales pesados en muestras biotratadas. El Pb, Zn y Cd se redujeron aproximadamente en un 33,3 %; 85,9 % y 29,9 %.

Otros estudios como el de Ríos (2023) que investiga la inmovilización del cobre por medio de la biomineralización de carbonato de calcio, obteniendo un porcentaje de eliminación de un 60% y 40%.

Las bases intercambiables es un parámetro esencial para comprobar si realmente se está dado el proceso de precipitación del carbonato de calcio por medio de la Precipitación de Carbonato Inducida por Microorganismos (MICP), dicho esto si existe un aumento en la

concentración de estas bases (Ca, Mg y Na) demuestra que realmente está funcionando el proceso de biocementación (Gonzalez et al., 2019).

Este incremento de los iones Ca, Mg y Na se evidencian en la figura 11 para el caso de ambos tipos de relaves, lo cual es muy favorable para el crecimiento óptimo de *Sporosarcina pasteurii*. Estudios como los de Ortega et al. (2022) aseguran que si existe un aumento de la concentración de calcio principalmente tendrá mejores resultados la biocementación y para este caso se puede ver un aumento considerable de este, pasando de en promedio 60 mg/kg a 25765,27 mg/ kg aproximadamente.

La difracción de rayos X y la fluorescencia de rayos x fueron empleados para conocer la composición de las muestras antes y después del proceso de biocementación, mostrando que el mineral con mayor presencia es el cuarzo u dióxido de silicio como se observa en la figura 12, 13 y 14, esto debido a que este es el más abundante en la superficie de la tierra y está presente en una amplia variedad de rocas (Sutherland, 2022). Por otro lado, en el análisis del DRX se observa un aumento en la calcita (CaCO_3) después del proceso de biocementación, siendo lo correcto pues con el proceso MICP, tenía que existir un aumento de este en especial para verificar el correcto funcionamiento del microorganismo. Natsi et al., (2019) menciona que la calcita es la forma cristalina más estable de CaCO_3 , por lo que tiende a precipitar en mayor cantidad a comparación de otras formas polifórmicas como la aragonita o vaterita.

El ensayo de compresión simple basado en la capacidad que cuenta un material para resistir fuerzas aplicadas perpendicularmente a su superficie y evaluando así su resistencia mecánica, siendo un parámetro fundamental para estudios de nuevos materiales de construcción como son los ladrillos y llegar a cumplir las normas estructurales o de materiales vigentes en el país (Lachheb et al., 2023).

En la figura 15 se puede evidenciar los resultados obtenidos de los ladrillos elaborados, en donde alcanzan presiones de hasta 15,76 MPa para el caso del relave filtrado y de 12,67 MPa para el no filtrado. Resultados muy favorables pues se llega a igualar o superar otros estudios similares como los de Meza y Silva (2020) que elaboran un ladrillo eco-

amigable a partir de relaves mineros, en una mezcla junto con cemento, cal, finos y gruesos, teniendo resultados de compresión simple de 12 MPa. Comprobando que el microorganismo si mejora esta cementación del material, ya sea, con la adición de otros cementantes como el cemento común y corriente.

El ensayo de resistencia a la flexión es otro parámetro importante para tener en cuenta para decidir si realmente el ladrillo elaborado puede ser aplicado de construcciones. En la figura 16 se muestran los resultados de este y se puede ver que alcanza una resistencia de en promedio 0,290 MPa para el relave filtrado y de 0,228 MPa del relave no filtrado, las cuales comparado con otros estudios están por debajo del promedio. Investigaciones como las de Bu et al., (2018) que desarrollaron materiales constructivos como los ladrillos biocementados mediante precipitación de calcita inducida por microbios y en el ensayo de flexión obtuvieron valores promedio de 0,25 MPa, Rojas (2022) que con ladrillos de concreto para mampostería alcanzó una resistencia en promedio de 0,92 MPa o Ullauri et al., (2022) que estudió los ladrillos artesanales cerámicos empleados en cuenca, mostrando una resistencia a la flexión de 0,13 MPa.

En la figura 17 se muestran los resultados de la resistencia al fuego de los ladrillos, en donde alcanzaron tiempos de 1,58 horas (ladrillos elaborados con relave filtrado) y de 1,43 horas (relave no filtrado). En el estudio de Pinto (2020) se estudiaron los ladrillos de abobe y se menciona que un muro de 30 cm de espesor de este material cuenta con una resistencia de 180 minutos (3 horas), un resultado mayor al obtenido para este caso pero que están en distintas condiciones, pues en esta se la realizó solamente al ladrillo de un espesor de 4 cm y no en un muro ya construido, haciendo que este en desventaja.

La tabla 3 muestra los resultados de la resistencia a la abrasión de los ladrillos, los cuales obtuvieron un grado de desgaste de entre muy bajo a bajo, pues este mantiene su integridad estructural y no pierde material de manera significativa, reflejando que está bien cohesionado y cuenta con propiedades de durabilidad aceptables (Dawood, 2021).

Finalmente, el cálculo de la huella de carbono mostrada en la figura 20, teniendo un resultado de 0,01 Kg CO₂eq por cada ladrillo y, por otro lado, está el ladrillo convencional, el

cual implica la cocción del mismo muestra resultados más altos. Según investigadores del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2022), mencionan que la elaboración de este tipo de ladrillo contribuye con 0,41 Kg de CO₂eq por cada ladrillo.

De igual manera en estudios realizados por Kulkarni y Rao (2016) en donde determinan la huella de carbono de la elaboración de ladrillos de arcilla cocida en la India y obtuvieron una estimación de 0,19 kg CO₂eq/ kg de ladrillo cocido. Con relación a los ladrillos elaborados por biocementación tienen una mayor huella de carbono, convirtiéndolo en una alternativa muy favorable para la construcción sostenible y en la lucha contra el calentamiento global.

Conclusiones

El relave (filtrado y no filtrado) muestra un incremento en el pH, lo que deja en evidencia el correcto funcionamiento combinado de *Sporosarcina pasteurii* y cemento, en el proceso de la hidrólisis de la urea que realiza favoreciendo la precipitación de carbonato de calcio en un ambiente alcalino.

Otro parámetro fundamental para la correcta dosificación de materiales en la elaboración de los ladrillos son los límites de Atterberg. El índice de plasticidad de estos ladrillos es 3,45% para el relave filtrado y 4,42% para el relave no filtrado, considerándose un material que se comporta como un limo de baja plasticidad según SUCS.

En el relave filtrado y no filtrado sin el proceso de biocementación se observa una concentración significativa de hierro (4224,4 y 4014,58 mg/kg) influyendo al correcto desarrollo del microorganismo debido a la inhibición de la actividad enzimática (ureasa), lo que puede causar que no se dé adecuadamente la hidrólisis de la urea y la precipitación de carbonato de calcio.

La *Sporosarcina pasteurii* tuvo la capacidad de inmovilizar los metales pesados, disminuyendo su concentración, siendo otra gran ventaja para el empleo de esta en futuras investigaciones de biorremediación de zonas afectadas por metales pesados, ya sea en suelos o agua.

En el ensayo de compresión simple con resistencias de 15,76 MPa para el relave filtrado y 12,53 MPa para el relave no filtrado, los ladrillos biocementados cumplen los requisitos mínimos según la norma INEN 3066 para un ladrillo clase A (13,8 MPa) y clase B (4 MPa) respectivamente, los cuales pueden ser empleados para construcciones de mampostería estructura y no estructural.

En el ensayo de resistencia al fuego con tiempos de 1,58 horas para el relave filtrado y 1,43 horas para el Relave no filtrado, lo convierten al ladrillo biocementado en una gran alternativa frente a otros ladrillos como los de la marca "Estanca" (1,5 horas), con valores similares e incluso más altos como el caso del relave filtrado.

La prueba de abrasión demostró que el ladrillo biocementado cuenta con un grado de desgaste muy bajo a bajo, comprueba la correcta cohesión de las partículas del relave con una estructura estable, siendo óptimo para el uso en zonas exteriores con presencia de materiales abrasivos.

El ladrillo elaborado a partir del relave filtrado fue el que obtuvo una mejor resistencia a la compresión simple, flexión y fuego. Evidenciando que el tratamiento que le hacen al relave puede funcionar de una mejor forma, sin embargo, esto implicaría un costo adicional al producto final.

De igual manera, la huella de carbono resultante del proceso de biocementación fue más bajo (0,01 Kg CO₂eq/ ladrillo) en relación del ladrillo testigo que obtuvo un valor de 0,19 Kg CO₂eq/ ladrillo o 0,22 Kg CO₂eq/ ladrillo para los ladrillos elaborados por Kulkarni y Rao (2016). En la que aplican procesos de cocción para mejorar sus propiedades mecánicas, comprobando que con este método de elaboración de ladrillos ecológicos es una alternativa favorable para combatir el cambio climático que vive el mundo en la actualidad.

Recomendaciones

En una posible siguiente etapa de esta investigación se recomienda realizar otras pruebas con diferentes fuentes de calcio, medio de cultivo, inclusive tomar otra fuente de urea para hacer el proceso con aún un menor impacto ambiental.

Investigar de manera más amplia la aplicación de otros tipos de materiales para la elaboración de los moldes para la elaboración de los ladrillos que aseguren el correcto desmolde de las muestras sin llegar a dañarlas por sus extremos o causar fisuras. Se recomienda usar aceite quemado de preferencia para aceitar los moldes y no usar moldes de madera por temas de humedad que puede absorber y perjudicar el proceso.

Realizar varias pruebas, con diferentes dosificaciones al mismo tiempo para ahorrar tiempo, puesto a que el tiempo de curado suele ser largo.

Se pueden hacer distintos procesos de curado a las probetas o prototipos finales, ya sea, con agua o al aire. Esto debido a que, si el material no está bien solidificado y cohesionado, al curarlo en agua este se puede desagregar por completo. Investigar de manera más profunda los métodos de inoculación que se debe realizar luego de la formación de la probeta para obtener una posible mejora en la precipitación de carbonato de calcio.

Referencias

- Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2010). Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures. *Journal Of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 38(9), 1229-1234. <https://doi.org/10.1007/s10295-010-0901-8>
- Afanador García, N., Guerrero Gómez, G., & Monroy Sepúlveda, R. (2012). propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mampostería. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22 (1), 43-58.
- Bu, C., Wen, K., Liu, S., Ogbonnaya, U., & Li, L. (2018). Development of bio-cemented constructional materials through microbial induced calcite precipitation. *Materials And Structures*, 51(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1157-4>
- Caballero, M., & Herrera, T. A. (2014). Dispersión de contaminantes por residuos mineros hacia una zona habitacional. [ojs.unipamplona.edu.co. https://doi.org/10.24054/aaas.v5i2.2006](https://doi.org/10.24054/aaas.v5i2.2006)
- Chen, M., Gowthaman, S., Nakashima, K., Takano, C., & Kawasaki, S. (2023). Baseline investigation on soil solidification through biocementation using airborne bacteria. *Frontiers In Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1216171>
- Chojolan, O. (2016). " Experiencias para mejorar la eficiencia energética de los hornos tradicionales de ladrillo para la cocción de ladrillo, teja, baldosa, de arcilla ". Usac. https://www.academia.edu/25061545/_experiencias_para_mejorar_la_eficiencia_energetica_de_los_hornos_tradicionales_de_ladrillo_para_la_coccion_de_ladrillo_teja_baldosa_de_arcilla_
- Chu, J., Ivanov, V., Naeimi, M., Stabnikov, V., & Liu, H. (2014). Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand. *Acta Geotechnica*, 9(2), 277–285. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0278-8>
- Cipyys. (2024, 19 marzo). La importancia de la construcción sostenible y la investigación y desarrollo (I+D). <https://www.linkedin.com/pulse/la-importancia-de-construccion-sostenible-y-investigacion-y-desarrollo-g89qe/>

- ClimatePartner GmbH. (2023, 8 febrero). Factores de emisión | ClimatePartner. ClimatePartner. <https://www.climatepartner.com/es/conocimientos/glosario/factores-de-emision>
- Cruz, E. (2022, 7 diciembre). Buscan transformar 900 millones de toneladas de relaves en materiales de construcción. Rumbo Minero. <https://www.rumbominero.com/peru/relaves-materiales-de-construccion/>
- Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2013). Biomineralization of Calcium Carbonate Polymorphs by the Bacterial Strains Isolated from Calcareous Sites. *Journal Of Microbiology and Biotechnology*, 23(5), 707-714. <https://doi.org/10.4014/jmb.1212.11087>
- Escare, C. C. (2021). Caracterización física, química y mineralógica del tranque de Relaves n°1, ex-planta La Cocinera, región de Coquimbo, provincia de Limarí, Chile. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/8970>
- Eugenio. (2023, 28 febrero). Por qué el sector de la construcción es clave para la economía y la creación de empleo - easyAlquiler. easyAlquiler. <https://easyalquiler.com/blog/por-que-el-sector-de-la-construccion-es-clave-para-la-economia-y-la-creacion-de-empleo/#:~:text=A%20trav%C3%A9s%20de%20la%20construcci%C3%B3n,mayor%20bienetar%20para%20la%20poblaci%C3%B3n.>
- FAO. 2021. Procedimiento operativo estándar para el análisis de carbonato de calcio equivalente en suelo - Método de
- Gad Los Encuentros. (2019). Actualización del PDOT del gobierno autónomo descentralizado parroquial rural los encuentros 2019-2023. En GAD los Encuentros. https://gadlosencuentros.gob.ec/wp-content/uploads/2022/11/PDyOT_LOS_ENCIENTROS-2019-2023_compressed.pdf
- Gonzalez, D., Guillarducci, A., Grether, R., Guerrero, S., & Andrés, F. (2019). Precipitación de carbonato de calcio inducida por microorganismos. evaluación de su utilidad en la reparación de fisuras en morteros de experimentación. *encontro latino americano e europeu sobre edificações e comunidades sustentáveis*, 947-953.

- Harris, D., Ummadi, J. G., Thurber, A. R., Allau, Y., Verba, C., Colwell, F., Torres, M. E., & Koley, D. (2016). Real-time monitoring of calcification process by *Sporosarcina pasteurii* biofilm. *The Analyst*, 141(10), 2887-2895. <https://doi.org/10.1039/c6an00007j>
- Hernández, J. M., Figueroa, B., & Menes, M. R. M. (2019). Propiedades físicas del suelo y su relación con la plasticidad en un sistema bajo labranza tradicional y no labranza. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 22, 53-61. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1858>
- Hernández, M. I. R., & De la Luz Pérez Rea, M. (2021). Characterization of mine tailings in their natural state and stabilized with cement, focused on construction. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22(2), 1-9. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.2.010>
- Hernández-Piedrazul, E., Castañeda-Robles, I. E., & Lizárraga-Mendiola, L. (2022). El bioconcreto como agente reparante en estructuras de concreto. *PÄDI Boletín Científico de Ciencias Básicas E Ingenierías del ICBI*, 10(Especial2), 176-183. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial2.8667>
- Hermosilla, A. (2014). Huella de Carbono en la Universidad Politécnica de Cartagena: En Busca de la Ecoeficiencia. Trabajo fin de Máster. Máster en Ingeniería Ambiental y de Procesos Sostenibles Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Cartagena, España.
- Iqbal, Dawood & Wong, Leong & Kong, Sih. (2021). Bio-Cementation in Construction Materials: A Review. *Materials* (Basel, Switzerland). 14. 10.3390/ma14092175.
- Ito Chalco, E. J. (2022). Revisión sistemática de la biorremediación del cadmio, plomo, arsénico y mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal.
- Jiménez, J. R., Pérez-Tapia, G. A., Lozano-Lunar, A., & Fernández-Rodríguez, J. M. (2023). Aprovechamiento de residuos mineros graníticos como árido en morteros autocompactantes.

- Kemperl, J., & Maček, J. (2009). Precipitation of calcium carbonate from hydrated lime of variable reactivity, granulation and optical properties. *International Journal of Mineral Processing*, 93(1), 84-88. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.05.006>
- Khoshtinat, S. (2023). Advancements in Exploiting *Sporosarcina pasteurii* as Sustainable Construction Material: A Review. *Sustainability*, 15(18), 13869. <https://doi.org/10.3390/su151813869>
- Kulkarni, N. G., & Rao, A. B. (2016). Carbon footprint of solid clay bricks fired in clamps of India. *Journal Of Cleaner Production*, 135, 1396-1406. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.152>
- Lalangui, L. F. L., Méndez Taco Méndez, D. S. M., & Jimenez, S. J. (2021). Caracterización de relaves mineros para su aprovechamiento en la fabricación de materiales de construcción. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/55505>
- Lapierre, F. M., Schmid, J., Ederer, B., Ihling, N., Büchs, J., & Huber, R. (2020). Revealing nutritional requirements of MICP-relevant *Sporosarcina pasteurii* DSM33 for growth improvement in chemically defined and complex media. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79904-9>
- Lauchnor, E., Topp, D., Parker, A., & Gerlach, R. (2015). Whole cell kinetics of ureolysis by *Sporosarcina pasteurii*. *Journal Of Applied Microbiology*, 118(6), 1321-1332. <https://doi.org/10.1111/jam.12804>
- Lázaro Cebas, J. (2015). Actividad enzimática en suelos contaminados por metales pesados y sus implicaciones como indicadores de calidad.
- Li, X., Wang, Y., Tang, J., & Li, K. (2022). Removal Behavior of Heavy Metals from Aqueous Solutions via Microbially Induced Carbonate Precipitation Driven by Acclimatized *Sporosarcina pasteurii*. *Applied Sciences*, 12(19), 9958. <https://doi.org/10.3390/app12199958>
- Livia, W. P., Uribe, B. S. S., & Martinez, C. H. C. (2022). Tratamiento de drenajes cidos de mina (dam) mediante filtros elaborados con relave minero. <https://www.redalyc.org/journal/6078/607872732009/html/>

- Lluís, G. E., & Ernest, B. M. (2020). Estabilización de suelos con bacterias *sporosarcina pasteurii*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=266084>
- Mahabub, M. S., Alahi, F., & Imran, M. A. (2023). Unlocking the potential of microbes: biocementation technology for mine tailings restoration — a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(40), 91676-91709. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28937-4>
- Mendoza, M. N., Quintero, R. I., Zaragoza, V. M. D., & Carrasco, V. (2021). Efecto de la aplicación de estiércoles composteados en la movilidad de las fracciones químicas del CU en un suelo contaminado con residuos mineros. *Deleted Journal*, 24. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.301>
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros. *Paideia XXI*, 11(1), 141-154. <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i1.3622>
- Meza, J. J., & Silva, W. M. (2020, 29 septiembre). *Estudio de los relaves mineros para la elaboración de ladrillos eco amigables*. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24461>
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No renovables. (2020). Instructivo para la aprobación de proyectos de diseño, 4/27 * construcción, operación y mantenimiento de depósitos de relaves para la mediana y gran minería. Quito.
- Ministerio de Minas y Energía. (2020, 23 octubre). Transformación minera. <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/transformaci%C3%B3n-minera/#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20es%20una%20actividad,m%C3%A1s%20antiguas%20de%20la%20humanidad.>
- Mujah, D., Shahin, M. A., & Cheng, L. (2016). State-of-the-Art Review of Biocementation by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization. *Geomicrobiology Journal*, 34(6), 524-537. <https://doi.org/10.1080/01490451.2016.1225866>
- Muñoz-Hernández, E. J., Ruiz-Sánchez, Á., Palacios-Beas, E. G., Reyes-Pérez, M., Urbano-Reyes, G., & Juárez-Tapia, J. C. (2023). Disolución de plata en relaves: evaluación del sistema Tiourea-Oxalato. *PÄDI Boletín Científico de Ciencias Básicas E*

- Ingenierías del ICBI, 11(Especial5), 156-160.
<https://doi.org/10.29057/icbi.v11iespecial5.11702>
- Musso, J., & Suazo, G. (2019). Determinación de la curva de retención de agua para relaves multimetálicos de la industria minera de Chile. *Obras y Proyectos*, 25, 22-29.
<https://doi.org/10.4067/s0718-28132019000100022>
- Natsi, P. D., Rokidi, S. G., & Koutsoukos, P. G. (2019). Precipitation of Calcium Carbonate (CaCO₃) in Water–Monoethylene Glycol Solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(12), 4732-4743. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b04180>
- Ortega, E., Arcos, M., Romero, M., Vasquez, C., & Palma-Cando, A. (2022). Precipitación de carbonatos inducida microbiológicamente como potencial estrategia en la restauración de estructuras patrimoniales. *Ge-conservacion*, 21(1), 224-234.
<https://doi.org/10.37558/gec.v21i1.1119>
- Petroenergía. (2021, 8 julio). 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-construccion#:~:text=Una%20de%20las%20ventajas%20del,procesos%20de%20trituracion%20y%20molienda>.
- Pinto, A. (2020, 12 abril). Construcción con ladrillos de adobe: desventajas y resistencia. *Ingeniería Real*. https://ingenieriareal.com/ladrillos-adobe/?srsltid=AfmBOooZBd73RqmIO3cFRUEjFMkOQTTBCHlogpM1sJuy7mSHWx-r5He_
- Pulickal, E., John, A. J., George, A., Suresh, A. M., & Mathew, M. (2021, 1 septiembre). *Enzyme Induced Calcium Carbonate Precipitation and Addition of Strengthening Materials: A Review*. <https://tost.unise.org/pdfs/vol8/no3/ToST-8x3x143-152xRA.html>
- Qabany, A., & Soga, K. (2013). Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils. *Géotechnique*, 63(4), 331-339.
<https://doi.org/10.1680/geot.sip13.p.022>

- Rodríguez, R., & García-Cortés, Á. (2006). Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente. Instituto Geológico y Minero de España.
- Sánchez, J. J. (2019, 9 noviembre). Límites de Atterberg: límite líquido y límite plástico gráfico de plasticidad de Casagrande. <http://hdl.handle.net/10251/120398>
- Sarmast, M., Farpoor, M. H., Sarcheshmehpoor, M., & M, K. E. (2014, 10 mayo). *Micromorphological and biocalcification effects of sporosarcina pasteurii and Sporosarcina ureae in Sandy Soil Columns*. Tarbiat Modares University Journals System - Journal of Agricultural Science And Technology. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-7564-en.html>
- Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile [SERNAGEOMIN]. (2018). Preguntas frecuentes sobre relaves. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf>
- Soon, Ng & Lee, Lee & Tan, Chewkhun & Siew Ling, Hii. (2013). Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 17. 10.1007/s12205-013-0149-8.
- Sutherland, G. (2022). *Quartz*. The Australian Museum. <https://australian.museum/learn/minerals/gemstones/quartz/>
- Tipian, C. (2023, 20 abril). Diseño de relleno minero que utiliza relave de oro y cobre como reemplazo de agregado fino. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/24759>
- titulación. Roma.
- Trujillo Peralta, F. A., López Avilés, G., Mondragón Camarillo, L., & Calderón, K. (2023). Bacterias tolerantes y resistentes a los metales pesados en el ambiente. *Epistemos (Sonora)*, 17(35), 80-87
- United Nations Environment Programme (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi

- Utem, A. (2021, 8 noviembre). ¿Cuál es el impacto ambiental de los relaves mineros? Admisión UTEM. <https://admission.utem.cl/2021/11/08/cual-es-el-impacto-ambiental-de-los-relaves-mineros/>
- Warino, J. W. (2024, 2 julio). *Cation Exchange Capacity (CEC) : Definition, Processes, factors, measurement, and role in agriculture*. AgriLandHub.com. <https://agrilandhub.com/cation-exchange-capacity/>
- Wu, Y., Li, H., & Li, Y. (2021). Biomineralization Induced by Cells of *Sporosarcina pasteurii*: Mechanisms, Applications and Challenges. *Microorganisms*, 9(11), 2396. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112396>
- Okwadha, G. D., & Li, J. (2010). Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. *Chemosphere*, 81(9), 1143-1148. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.066>
- Lai, Hanjiang & Cui, Ming-Juan & Chu, Jian. (2022). Effect of pH on soil improvement using one-phase-low-pH MICP or EICP biocementation method. *Acta Geotechnica*. 18. 1-14. [10.1007/s11440-022-01759-3](https://doi.org/10.1007/s11440-022-01759-3).
- Tang, C., Yin, L., Jiang, N., Zhu, C., Zeng, H., Li, H., & Shi, B. (2020). Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review. *Environmental Earth Sciences*, 79(5). <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8840-9>
- Grajales Ríos, N. (2023). *Biomineralización de carbonato de calcio (CaCO₃) inducida por bacterias para la inmovilización de iones cobre (Cu²⁺) con potencial para aplicaciones en suelos agrícolas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ullauri, M. D. C. A., Bastidas, M. R., Bustamante, J. R., & Carchipulla, E. C. (2022). El ladrillo artesanal de Cuenca (Ecuador): una caracterización inicial en el marco patrimonial. *Conservar Património*, 41, 68-94.

Apéndice

Apéndice A. Pretratamiento del relave

Figura A1

Extracción del relave de los tanques de almacenamiento

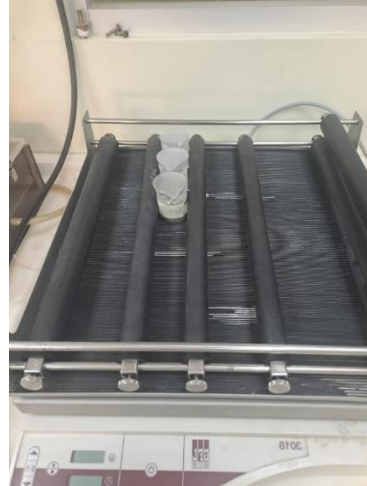
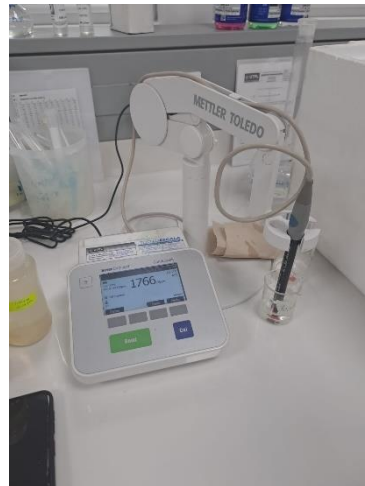


Figura A2

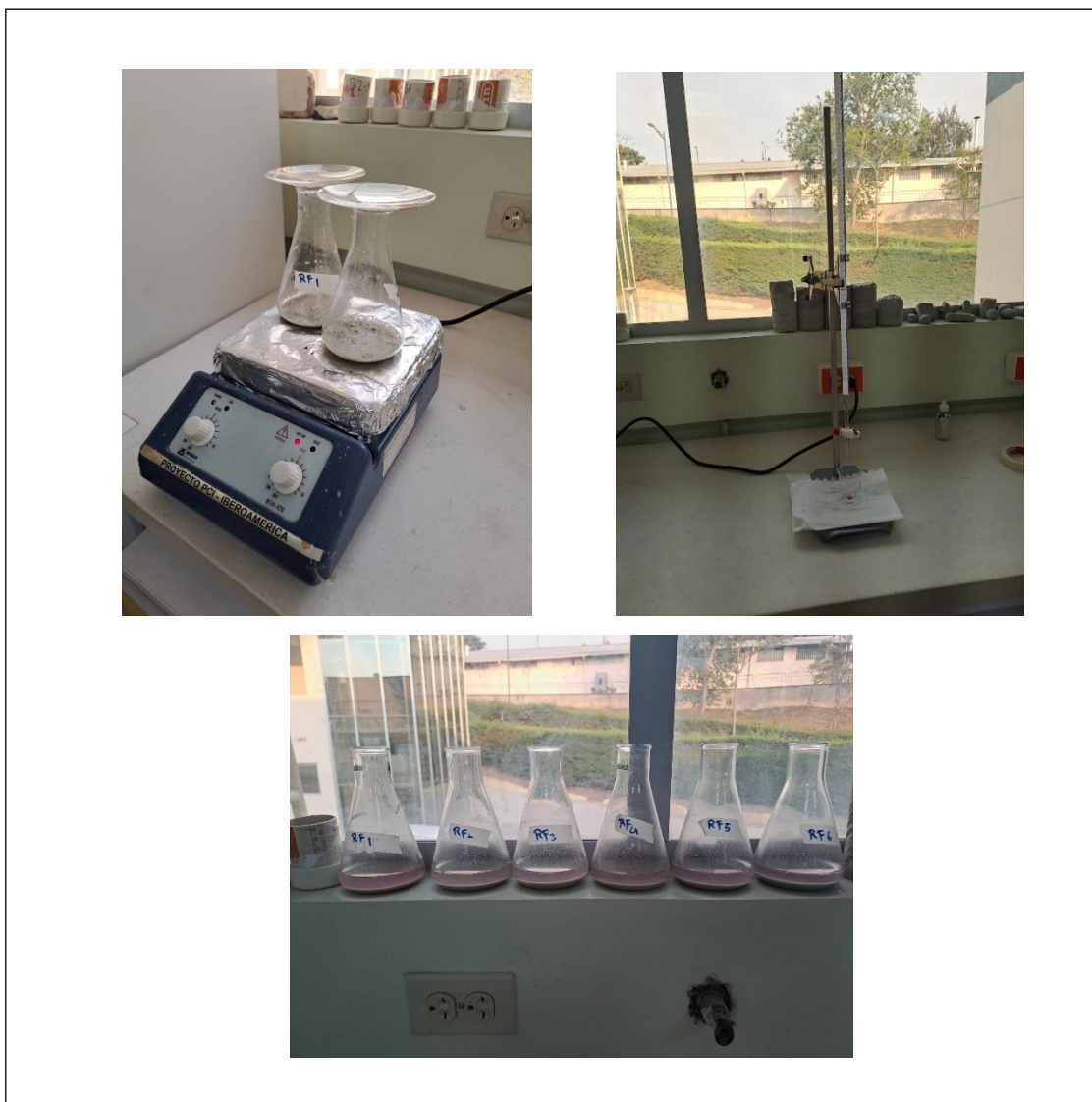
Secado, Trituración y tamizado del relave



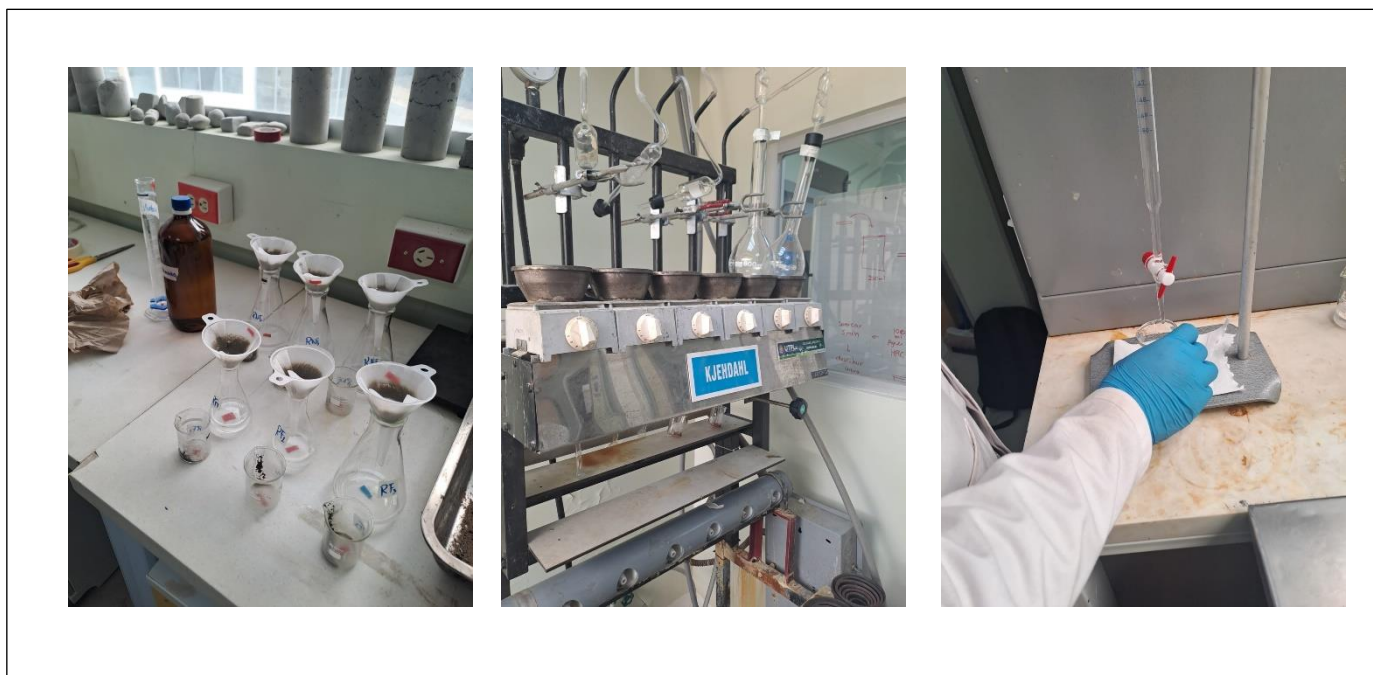
Apéndice B. Análisis del pH y conductividad eléctrica



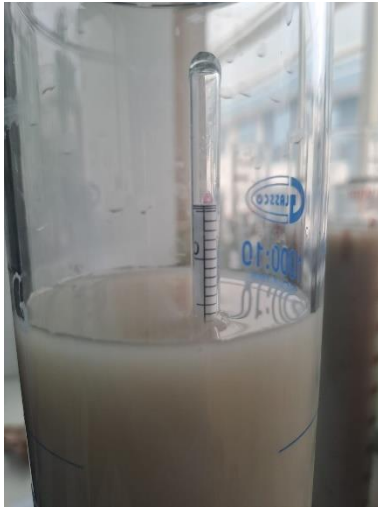
Apéndice C. Análisis de carbonatos



Apéndice D. Análisis de CIC



Apéndice E. Análisis de textura



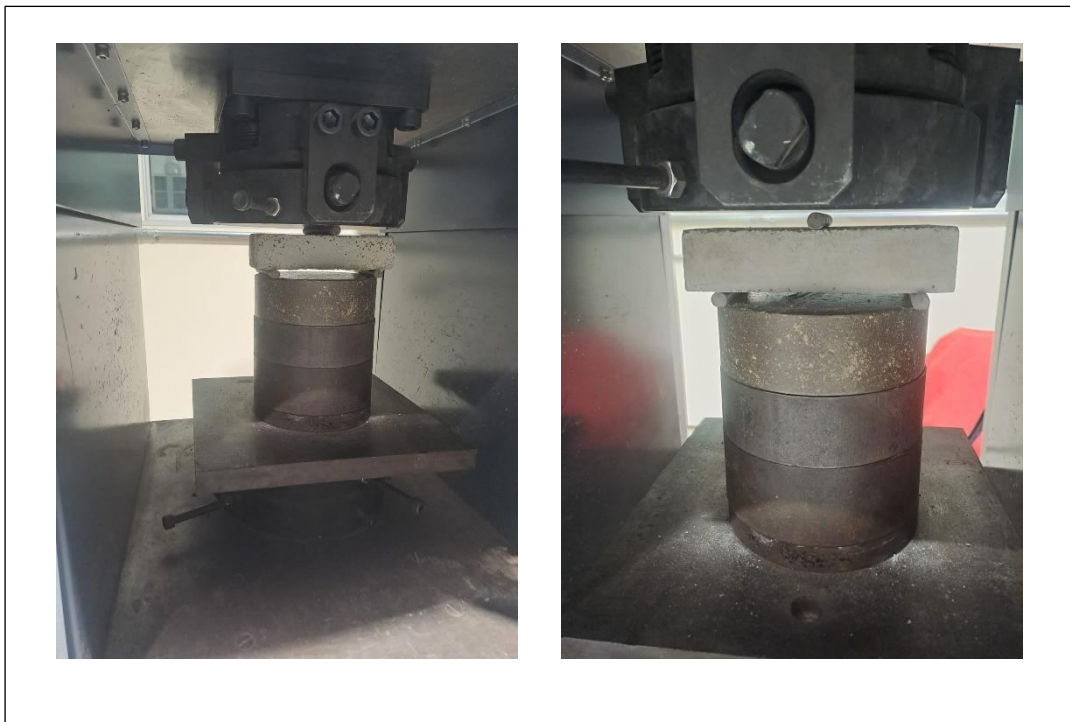
Apéndice F. Ladrillos elaborados



Apéndice G. Ensayo de compresión simple



Apéndice H. Ensayo de flexión



Apéndice I. Ensayo de resistencia al fuego



Apéndice J. Ensayo de abrasión

