

Estudio de la calidad ambiental del ladrillo de construcción obtenido a partir de mezclas que incluyen residuos de flotación de minerales polimetálicos de california, Santander.

Mayra Alejandra Bayona Pereira; Juan Diego Alfonso González

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director:

Walter Pardavé Livia

Magister en ingeniería metalúrgica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios por bendecirme y darme siempre fortaleza para superar cada dificultad durante este camino.

A mi mamá, Sandra Milena Pereira Sánchez por luchar por mí, por hacer todo lo posible para poder alcanzar esta meta. Por ser la mejor mamá, amiga y consejera, mi ejemplo a seguir. Por ser mi apoyo en todo momento y siempre motivarme para alcanzar todo lo que me proponga. A ella le agradezco infinitamente por este logro, es por ella y para ella. Gracias por forjar la mujer que soy y todo lo que ha hecho por mí. La amo inmensamente.

A mi hermano por estar a mi lado en cada momento, por estar para mí. A mi tía y prima, Gloria Sánchez y Catherine Bohórquez por creer en mí, por darme su apoyo incondicional. Por ser las personas más pacientes e incondicionales, presentes en todo momento, por el amor y la motivación. Gracias por querer siempre lo mejor para mí.

A Juan, por ser mi novio, amigo y compañero de tesis. Por cada momento vivido, por cada risa y etapa que pudimos superar juntos, por ser mi apoyo. Por su dedicación y esfuerzo hicimos posible este logro. A mis familiares, amigos, compañeros, a cada persona que estuvo en mi vida e hizo parte de este proceso. Gracias por el apoyo, experiencias e incondicionalidad durante este camino.

A mis profesores, John Freddy Palacios, Ana María Pérez y Mauricio Rincón por estar para mí cuando más los necesité. Gracias por sus consejos, apoyo y enseñanza.

Un besito al cielo para mi ángel.

Mayra Alejandra Bayona Pereira.

Dedicatoria

A Dios por darme la capacidad de superar cada una de las pruebas que se presentaron durante este camino de la vida universitaria y permitirme llegar hasta esta etapa final.

A mis padres, Gonzalo Alfonso y Johanna González por siempre apoyarme en cada paso que he dado durante mi vida y durante mi carrera universitaria, por los consejos, los regaños y todo lo que han permitido que todo lo que un día parecía un sueño lejano, hoy sea una realidad.

A mi abuela, Elvia Rodríguez por ser una parte importante de mi vida y mi crianza, por siempre darme palabras de aliento y creer en todo lo que podría lograr, espero poder seguir contando con eso muchos años más y poder dedicarle todos mis logros.

A mis amigos de toda la vida Oscar y Cristian por siempre darme la motivación necesaria y no permitir que me rinda, por siempre decir que les daría orgullo tener un amigo ingeniero y porque a pesar de la distancia siempre están presentes.

A Alejandra Bayona, mi compañera de tesis y novia quien ha estado conmigo en la mayoría de la carrera, por siempre brindarme su apoyo incondicional, sus consejos, enseñanzas y la motivación necesaria para cumplir lo que alguna vez fue un sueño y hoy lo hemos conseguido juntos.

Juan Diego Alfonso González

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por formarnos como ingenieros en la mejor universidad del país.

A la escuela de ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales por la formación profesional, compromiso y dedicación para formarnos como profesionales íntegros.

A cada técnico de los laboratorios que fueron guías y maestros de enseñanzas.

A nuestro director de tesis Msc. Walter Pardavé Livia, por el apoyo y herramientas brindadas para culminar este proceso.

Tabla de contenido

	Pag.
Introducción	13
1. Fundamentación teórica	15
1.1. Relaves mineros	15
1.1.1. Generación y tratamientos de relaves mineros.....	15
1.2. Pasivos ambientales (PAM)	16
1.3. Aprovechamiento o reutilización de los relaves mineros	17
1.4. Regulación de los pasivos ambientales o relaves mineros en Colombia	17
1.5. Ladrillos obtenidos a partir de residuos o relaves mineros	18
1.6. Prueba ABA	18
1.7. Pruebas de toxicidad en diversos ambientes agresivos con normativa EPA	19
1.7.1. pH.....	20
1.7.2. Conductividad	20
1.7.3. Resistencia.....	20
1.7.4. Nitratos.....	20
1.7.5. Nitritos.. ..	21
1.7.6. Metales pesados	21
1.8. Economía circular	21
2. Objetivos	22
2.1. Objetivo general	22
2.2. Objetivos específicos	22
3. Metodología experimental	23

3.1. Revisión bibliográfica	23
3.1.1. Definir...	23
3.1.2. Idear.....	24
3.1.3. Prototipar.....	26
3.1.4. Probar.....	28
4. Resultados y discusiones.....	32
4.1. Datos obtenidos pruebas de hidratación.....	33
4.2. Datos obtenidos ensayo resistencia a la compresión.....	34
4.3. Datos obtenidos pH:	34
4.4. Comparación de la resolución 0631 de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, con los resultados obtenidos:	35
4.4.1. Datos obtenidos de conductividad:	36
4.5. Comparación con la resolución-1256 de 2021 del ministerio de ambiente de desarrollo sostenible, con los resultados obtenidos:	36
4.5.1. Datos obtenidos de Resistividad:	37
4.5.2. Datos obtenidos de Nitratos:	38
4.6. Comparación con la resolución-1256 de 2021 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, con los resultados obtenidos:	39
4.6.1. Datos obtenidos de Nitritos:.....	39
4.7. Comparación de la resolución 0631 de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, con los resultados obtenidos:	40
4.7.1. Datos obtenidos sulfatos	41
4.8. Comparación de la resolución 0631 de 2015 con los resultados obtenidos.....	41
4.8.1. Datos obtenidos metales pesados	42

4.9. Comparación con el procedimiento EPA 200.7(ICPOES) & 200.8 (ICPMS) con los resultados obtenidos.....	43
4.9.1. Resultados prueba ABA.....	44
5. Conclusiones.....	48
6. Recomendaciones.....	49
Referencias Bibliográficas.....	50
Apéndices.....	54

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Esquema de fabricación ladrillo sustituyendo arena fina en un 50% por relave.</i>	26
Figura 2. <i>Montaje de embudo, pesaje del relave, Sistema de simulación lluvia (goteo), llave de paso.</i>	27
Figura 3. <i>Montaje general para ensayos de calidad ambiental.</i>	27
Figura 4. <i>Promedio datos pH de las muestras.</i>	35
Figura 5. <i>Promedio datos conductividad de las muestras.</i>	36
Figura 6. <i>Promedio datos de resistividad de las muestras.</i>	38
Figura 7. <i>Promedio datos nitratos de las muestras.</i>	38
Figura 8. <i>Promedio datos nitritos de las muestras.</i>	40
Figura 9. <i>Características químicas del agua que tienen implicaciones sobre la salud humana.</i> .	40
Figura 10. <i>Promedio datos sulfatos de las muestras.</i>	41
Figura 11. <i>Promedio datos metales pesados de las muestras.</i>	42
Figura 12. <i>Criterio de interpretación para los resultados de la prueba ABA.</i>	44
Figura 13. <i>Porcentaje cuantitativo en óxidos y elemental (FRX).</i>	47

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Porcentajes de distribución sustituyendo arena fina por relave en un 10-50-90%.</i>	24
Tabla 2. <i>Porcentajes de distribución sustituyendo cemento por relave en un 10-50-90%.....</i>	24
Tabla 3. <i>Requerimientos ensayo compresión.....</i>	25
Tabla 4. <i>Volumen en función del Fizz Rate.....</i>	31
Tabla 5. <i>Resultados prueba de hidratación.</i>	33
Tabla 6. <i>Resultados resistencia a la compresión de los ladrillos.....</i>	34
Tabla 7. <i>Registro promedio de datos pH de las muestras.</i>	34
Tabla 8. <i>Registro promedio datos conductividad de las muestras.</i>	36
Tabla 9. <i>Límites permisibles de aguas residuales.</i>	36
Tabla 10. <i>Registro promedio datos Nitratos de las muestras.</i>	38
Tabla 11. <i>Registro promedio datos Nitritos de las muestras.....</i>	39
Tabla 12. <i>Registro promedio de datos de sulfatos de las muestras.</i>	41
Tabla 13. <i>Registro promedio datos y Metales pesados de las muestras.....</i>	42
Tabla 14. <i>Registro concentración de azufre en ladrillo pulverizado.....</i>	45
Tabla 15. <i>Porcentajes de abundancia del análisis FRX.....</i>	46

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice a. Toma de fosfatos, nitratos, sulfatos	54
Apéndice b. Metales pesados.....	56
Apéndice c. Toma prueba ABA.....	57

Resumen

Título: Estudio de la calidad ambiental del ladrillo de construcción obtenido a partir de mezclas que incluyen residuos de flotación de minerales polimetálicos de California, Santander.

Autor: Mayra Alejandra Bayona Pereira; Juan Diego Alfonso González

Palabras Clave: Relave de flotación, ladrillo, Pruebas de toxicidad, calidad ambiental, pasivos ambientales

Descripción:

En el presente proyecto se llevó a cabo un estudio de la calidad ambiental del ladrillo obtenido a partir de mezclas que incluyen agua, cemento y relave procedente del municipio de California, Santander, el cual contiene residuos de flotación de minerales polimetálicos. El proceso necesario para obtener dicho ladrillo se detalla mediante un esquema que involucra operaciones de lavado, filtrado y secado, con el propósito de eliminar elementos como el Xantato Amílico de Potasio (PAX), el Metil Isobutil Carbinol (Aceite de Pino) y el Sulfhidrato de Sodio (NASH). Estos elementos son comúnmente utilizados como agentes químicos durante el proceso de flotación. Posteriormente, se procede a la peletización y a la preparación de las mezclas necesarias para la obtención del ladrillo. Se llevaron a cabo pruebas específicas, que implican la obtención de muestras tanto del relave como del ladrillo, sometiendo a diferentes condiciones ambientales simuladas, que reflejan las situaciones a las que podrían estar expuestos durante su vida útil. El objetivo de estas pruebas era analizar la presencia de metales pesados, nitritos, nitratos, sulfatos, conductividad, resistividad y pH. Los resultados obtenidos se compararon con las regulaciones vigentes, en las cuales se establecen los parámetros y límites máximos permitidos. Los resultados indicaron que la muestra del ladrillo cumplía con dichos estándares, ya que estaba destinada a estar expuesta a tales condiciones ambientales. Finalmente, se llevó a cabo la prueba ABA en una muestra de ladrillo pulverizado para determinar si se generaba o no drenaje ácido. Los resultados de esta prueba arrojaron un alto potencial de generación de ácido, sin embargo, con las pruebas ambientales se pudo determinar que este es apto. En resumen, se concluyó que el ladrillo obtenido mostraba una buena calidad ambiental al cumplir con las normativas vigentes.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardavé Livia. Magister en Ingeniería Metalúrgica.

Abstract

Title: Study of the environmental quality of construction brick obtained from mixtures that include flotation residues of polymetallic minerals from California, Santander.

Author: Mayra Alejandra Bayona Pereira; Juan Diego Alfonso Gonzalez

Key words: Flotation tailings, brick, Toxicity testing, environmental quality, environmental liabilities

Description:

In the present project, a study was carried out on the environmental quality of the brick obtained from mixtures that include water, cement and tailings from the municipality of California, Santander, which contains polymetallic mineral flotation residues. The process necessary to obtain such brick is detailed through a scheme that involves washing, filtering and drying operations, with the purpose of eliminating elements such as Potassium Amyl Xanthate (PAX), Methyl Isobutyl Carbinol (Pine Oil) and Sodium Sulphydrate (NASH). These elements are commonly used as chemical agents during the flotation process. Subsequently, pelletizing and preparation of the mixtures necessary to obtain the brick is carried out.

Specific tests were carried out, which involved obtaining samples of both the tailings and the brick, subjecting them to different simulated environmental conditions, reflecting the situations to which they could be exposed during their useful life. The objective of these tests was to analyze the presence of heavy metals, nitrites, nitrates, sulfates, conductivity, resistivity and pH. The results obtained were compared with the regulations in force, which establish the parameters and maximum allowable limits. The results indicated that the brick sample complied with these standards, since it was intended to be exposed to such environmental conditions.

Finally, the ABA test was carried out on a sample of pulverized brick to determine whether or not acid drainage was generated. The results of this test showed a high potential for acid generation, however, with the environmental tests it was determined that it is suitable. In summary, it was concluded that the brick obtained showed good environmental quality by complying with current regulations.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Director: Walter Pardave Livia. Master's degree in metallurgical engineering.

Introducción

La minería en Colombia representa una fuente de sostenibilidad económica para numerosas familias en diversos departamentos del país. Esto se debe a que la extracción de minerales, como el oro, resulta altamente rentable tanto a nivel nacional como internacional. No obstante, las posibles consecuencias ambientales de no llevar a cabo los procedimientos adecuados podrían ser irreversibles en el futuro.

Un caso de particular interés se refiere a los relaves derivados del proceso de flotación en la extracción de minerales polimetálicos. En su mayoría, estos residuos no se gestionan ni reciclan de manera adecuada, dado que no se considera rentable para las empresas cuyo enfoque principal es la extracción de minerales de interés. Por consiguiente, en los últimos años, se ha incrementado la atención hacia estos asuntos debido a los impactos ambientales evidenciados, como la contaminación del suelo, la liberación de material particulado que puede afectar a los residentes cercanos, la contaminación del agua y los problemas de salud que afectan directamente a la población trabajadora y a las comunidades cercanas a las minas. Por tanto, este tipo de residuos ha llegado a ser considerado un pasivo ambiental, que podría desembocar en drenajes ácidos de minas (DAM).

Hasta la fecha, en Colombia, no se ha abordado adecuadamente el tratamiento de estos pasivos ambientales. Esto se debe a la falta de importancia otorgada al tema y a que una parte significativa de la actividad minera en el país se desarrolla de manera ilegal, ya que cerca del 85% del oro que se exporta en Colombia no es legal, (El tiempo, 2023), lo que limita la experiencia y

el conocimiento necesarios para gestionar, almacenar y tratar de manera adecuada estos residuos, con el fin de mitigar la contaminación derivada de los procesos mineros.

En consecuencia, como resultado de lo mencionado anteriormente, se proponen pruebas de calidad ambiental y toxicidad para evaluar ladrillos obtenidos a partir de mezclas que incluyan estos residuos (relaves), sometiéndose a diversos escenarios que simulan las distintas condiciones que podrían presentarse a lo largo de su vida útil. Posteriormente, estos resultados se compararon con los límites permitidos por las autoridades y las regulaciones ambientales, garantizando la seguridad de su utilización. De esta manera, se busca ofrecer una posible solución que contribuya a la reducción de la contaminación y promueva la aplicación de principios de economía circular.

1. Fundamentación teórica

1.1. Relaves mineros

Los relaves son sólidos, generalmente se encuentran triturados o molidos, y contienen una alta concentración de elementos químicos producto del beneficio de minerales en los procesos de minería. Deben ser tratados de forma adecuada, ya que pueden presentar afectaciones tanto ambientales como sociales, trayendo consecuencias y daños irreparables (Cárdenas, 2019).

Debido a la contaminación y otros problemas que se pueden generar gracias a los relaves mineros, es importante someterlos a diversos tratamientos que dependen del tipo de componentes presentes en ellos. Por lo tanto, se deben almacenar en presas y depósitos o, en el mejor de los casos, darles un nuevo uso en aplicaciones como la construcción, fabricación de ladrillos, postes, etc. (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

1.1.1. Generación y tratamientos de relaves mineros

En el proceso de beneficio de minerales, este se tiene inicialmente en forma de rocas que son extraídas directamente de las minas y que son llevadas a una fase de trituración, donde lo que se busca es conseguir un tamaño adecuado para los procesos posteriores. Por lo tanto, esto puede ser ejecutado varias veces. Seguido a esto, se lleva a un proceso de molienda para finalmente obtener el tamaño adecuado para la flotación. En este último procedimiento, lo que se hace es recuperar el mineral de interés por medio de gravimetría, mediante la adición de sustancias químicas que hacen que el mineral suba a la superficie y se pueda recuperar fácilmente. El resto

del material particulado que queda es desechado, ya que no representa un interés o un beneficio económico, por lo que esto ya puede considerarse un relave minero (Cárdenas, 2019).

Existen diversos tratamientos para los relaves mineros; sin embargo, estos estarán relacionados directamente con el tipo de proceso utilizado para la producción de dichos relaves, la ubicación y las sustancias químicas utilizadas. Estos pueden clasificarse dependiendo de la cantidad de líquido presente en ellos, por lo que se pueden clasificar como relave tradicional, en pasta, filtrado, y de esto dependerá su posterior clasificación (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

1.2. Pasivos ambientales (PAM)

Los pasivos ambientales son residuos mineros que no son tratados de forma adecuada y pueden llegar a presentar un riesgo ambiental o socioeconómico que produce consecuencias tanto a corto como largo plazo. Generalmente, los PAM generan contaminación ambiental, entre la cual se destacan: pilas de desechos, paisajes físicamente alterados, contaminación de aguas, ya sean superficiales o subterráneas, filtración de ácidos y lavado de metales (Arango & Olaya, 2012).

Los impactos socioeconómicos se ven directamente relacionados con los impactos ambientales, por lo que siempre dependerá uno del otro. Algunos de estos casos pueden ser las pérdidas de terreno con potencial productivo a causa de la contaminación ambiental o de suelos, o la contaminación del agua debido a las sustancias químicas o metales pesados liberados (Cárdenas, 2019).

1.3. Aprovechamiento o reutilización de los relaves mineros

Debido a la contaminación que se genera gracias al mal manejo de los pasivos ambientales provenientes de la flotación de minerales polimetálicos, se han planteado diversas maneras de darle un nuevo uso a estos relaves con el fin de disminuir el impacto que estos residuos generan. Entre los cuales se destacan materiales utilizados para jardinería, como abonos; para calles, como relleno; o incluso en la fabricación de cemento y concreto.

El agua proveniente de la minería puede ser utilizada en sectores agrícolas en la eliminación de polvos. También, el agua puede ser reutilizada en procesos de minería con el fin de minimizar el gasto de este y la producción de relaves (ICMM, 2022).

1.4. Regulación de los pasivos ambientales o relaves mineros en Colombia

En Colombia, usualmente los proyectos de gran minería se rigen por estándares internacionales o, dependiendo del origen de su casa matriz. Esto se debe a que no se cuenta con una normativa y regulación específica respecto a los relaves mineros, ya que no se posee mayor experiencia y conocimiento en su gestión. En países internacionales como Chile, Canadá, entre otros, existen orientaciones y marcos legales relacionados con las presas de relaves.

Se cuenta con un documento elaborado en el marco del Contrato de Consultoría GGC-468-2020 celebrado entre el Ministerio de Minas y Energía (Dirección de Minería Empresarial) y ATG Ltda. En este documento se presenta la recopilación y análisis de información perteneciente a las técnicas, principios y metodologías de la gestión y manejo de presas de relaves. Además, se abarca la elaboración de la propuesta de los lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en la minería (Ministerio

1.5. Ladrillos obtenidos a partir de residuos o relaves mineros

Para el tratamiento de relaves, se han generado iniciativas y proyectos con el fin de fabricar ladrillos a base de ellos, buscando reducir la contaminación en el suelo y agua de cada zona, a la vez que generan un material económico y sostenible. Es importante resaltar que estos proyectos se encuentran en una fase experimental y aún no se han implementado en la industria. Para esto, es necesario realizar estudios que evalúen la calidad y resistencia a largo plazo.

Estos proyectos representan una oportunidad interesante para la reutilización de residuos mineros y la generación de materiales de construcción sostenibles en Colombia. Esto se debe a que, como país, no contamos con estructuras significativas para el manejo de relaves, lo que presenta desafíos significativos. Aunque se muestra una economía en crecimiento, las innovaciones tecnológicas son escasas y el recurso humano especializado es limitado (Universidad Nacional de Colombia, 2018).

1.6. Prueba ABA

La prueba ABA (Acid-Base Accounting) es un ensayo químico usado como predictor del potencial de generación de drenaje ácido. Consiste en establecer el potencial de generación de ácido (Potencial de acidificación, PA) y el potencial de neutralización (Potencial de Neutralización, PN) de una muestra específica para hallar el potencial neto de neutralización (NNP) y la relación PN/PA. Estos resultados se comparan con valores referenciales con el objetivo de descartar las muestras como potenciales o no potenciales generadoras de drenaje

Las relaciones que dan los resultados ABA:

$$PNN = PN - PA, \text{ considerando que:}$$

Si $PNN > +20$, la muestra NO GENERA DRENAJE ÁCIDO

Si $PNN < -20$, la muestra SI GENERA DRENAJE ÁCIDO

Si $-20 < PNN < +20$, la muestra es de comportamiento INCIERTO.

1.7. Pruebas de toxicidad en diversos ambientes agresivos con normativa EPA

Es fundamental tener en cuenta que, cuando un material es expuesto al ambiente o a condiciones que puedan variar, entra en contacto con el oxígeno y diversas sustancias presentes. Estas alteraciones pueden provocar cambios físicos o químicos que, a su vez, pueden ocasionar riesgos para la salud humana y contaminación del medio ambiente. El propósito de estas pruebas es salvaguardar la integridad humana y ambiental, basándose en la normativa de la EPA (Agencia de Protección Ambiental, por sus siglas en inglés). Estas pruebas se realizaron en un ladrillo prototipo y en el relave con el fin de verificar que no existan agentes tóxicos.

Las pruebas realizadas se basaron en la resolución 0631 de 2015, capítulo 5, donde se establecen los parámetros y los límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Debido a que nuestros ladrillos van a estar expuestos a ambientes que simulan la intemperie, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros: pH, Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Resistividad (25°C) ($\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$), Nitratos(ppm), Nitritos (NO_2^-), Metales pesados

1.7.1. pH

Este se refiere al pH, que representa la concentración de iones H⁺, los cuales determinan el grado de basicidad o acidez de una solución. Para esto se maneja una escala que va de 0 a 14, donde 7 es el valor neutro. Los pH que presentan un valor menor a 7 se consideran ácidos, y los que presentan un pH mayor a 7 son básicos.

1.7.2. Conductividad

La conductividad es la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de iones disueltos en agua, cargados positiva y negativamente. La medida más usada para la conductividad es el microSiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$). En el caso de las soluciones acuosas, la conductividad es directamente proporcional a la cantidad de sólidos disueltos, por lo que, entre mayor concentración presente, mayor será la conductividad.

1.7.3. Resistencia

La resistencia es el inverso de la conductividad, se puede definir como la capacidad que tiene una solución para resistir el flujo de una corriente eléctrica, la unidad de medida es el megaohms/cm ($\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$).

1.7.4. Nitratos

Los nitratos son compuestos químicos inorgánicos, formados principalmente por 3 átomos de oxígeno y uno de nitrógeno, junto con una carga negativa, y se pueden encontrar fácilmente en el ambiente, ya sea en los suelos o disueltos en agua.

1.7.5. Nitritos

Son compuestos iónicos naturales que forman parte del ciclo del nitrógeno y se pueden encontrar en la naturaleza en formas que son fácilmente solubles en agua. Generalmente, se les relaciona con iones como el sodio o el potasio, y suelen oxidarse al entrar en contacto con el oxígeno. La unidad de medida es las partes por millón (ppm).

1.7.6. Metales pesados

Los elementos pesados son aquellos elementos que presentan una densidad superior a 4 g/cm³, un peso atómico mayor a 20 y que pueden ser tóxicos en concentraciones pequeñas. Algunos de los elementos pesados más comunes son el aluminio (Al), berilio (Be), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), entre otros.

Es importante poder identificar este tipo de elementos, ya que pueden presentar un peligro para la vida humana y el ambiente debido a su grado de toxicidad, lo que puede traer consigo grandes problemas tanto ecológicos, de salud y económicos.

1.8. Economía circular

La economía circular es un modelo de producción y consumo en el cual se requiere reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales con el fin de generar un valor añadido y aumentar el ciclo de vida de los productos ya existentes. Involucra reducir los residuos al mínimo. Esto se logra cuando un producto llega al final de su vida útil, y los materiales que lo conforman se reutilizan para ser productivamente usados, creando así un valor adicional y reduciendo de esta manera los residuos (Noticias Parlamento Europeo, 2023).

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades de hidratación, toxicidad y exposición a medios agresivos como el agua potable y lluvia ácida; del ladrillo de construcción obtenido a partir de mezclas que incluyen residuos de flotación de minerales polimetálicos.

2.2. Objetivos específicos

Obtener un ladrillo de construcción, a partir de mezclas que incluyen un residuo de flotación de minerales polimetálicos de California, Santander

Evaluar las propiedades mecánicas de absorción en agua y de toxicidad mediante la prueba ABA.

Establecer condiciones y variables adecuadas de exposición del ladrillo obtenido en medios agresivos como agua potable, lluvia ácida y lluvia smog, mediante análisis de metales pesados antes y después de lixiviaciones realizadas.

3. Metodología experimental

3.1. Revisión bibliográfica

Se inicia con la investigación sobre los tratamientos y usos que se dan a los relaves mineros, de tal manera que se identifiquen los problemas que estos podrían causar durante su uso. En la revisión bibliográfica, se tendrán en cuenta las diferentes normativas a cumplir para que el relave pueda ser utilizado en la fabricación de ladrillos y las pruebas a realizar para cumplir con dicha normativa, con el fin de alcanzar los objetivos planteados. Una vez recolectada la información necesaria, se procede a la parte práctica del proyecto.

3.1.1. Definir

En el proceso de flotación, el relave adquiere diferentes agentes químicos, tales como Xantato amílico de potasio (PAX), Metil isobutil carbinol (Aceite de pino), Sulfhidrato de sodio (NASH). Para su eliminación, se realiza un lavado con agua a una temperatura de 60°C. La realización de este proceso se debe hacer con una plancha de calentamiento para obtener la temperatura requerida. Seguido de esto, se filtra la pulpa para ingresarla al proceso de secado en una estufa de calentamiento a lo largo de 24 horas.

Por último, y con el fin de garantizar que los posibles metales pesados presentes en el relave no queden expuestos al ambiente directamente, se realiza un proceso de peletización. En este proceso, se usa una mezcla de 80% de relave, 18% de cemento y 2% de cal, formando pellets añadiendo agua para posteriormente ser secados y almacenados.

3.1.2. Idear

En esta etapa, se realiza la obtención del ladrillo a partir de las mezclas que incluyen residuos de flotación de minerales polimetálicos de California, Santander. Para esto, se deben realizar pruebas de hidratación para su fabricación teniendo en cuenta la distribución en porcentaje en peso correspondiente al cemento (25%) y arena fina (75%). Se realizan diferentes mezclas en peso sustituyendo la arena fina por relave, manteniendo el porcentaje de cemento fijo, y sustituyendo el cemento por relave, manteniendo el porcentaje de arena fijo en distribuciones de 10%, 50%, 90%, como se muestra a continuación (Ver Tablas 1 y 2).

Tabla 1.

Porcentajes de distribución sustituyendo arena fina por relave en un 10-50-90%.

SUSTITUCIÓN DE ARENA FINA POR RELAVE	Mezcla 1 10%	Mezcla 2 50%	Mezcla 3 90%
%Arena fina	67.5	37.5	7.5
%Relave	7.5	37.5	67.5
%Cemento	25	25	25

Tabla 2.

Porcentajes de distribución sustituyendo cemento por relave en un 10-50-90%.

SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR RELAVE	Mezcla 1 10%	Mezcla 2 50%	Mezcla 3 90%
--	-------------------------	-------------------------	-------------------------

%Arena fina	75	75	75
%Relave	2.5	12.5	22.5
%Cemento	22.5	12.5	2.5

La elección de la mezcla adecuada se eligió basado en la NTC 4026, la cual consiste en someter diferentes probetas a una carga hasta la falla bajo los siguientes requerimientos:

Tabla 3.

Requerimientos ensayo compresión.

Velocidad de ensayo	Temperatura	Humedad	Capacidad del equipo
0,10 mm/s	23°C	60%	1500 KN

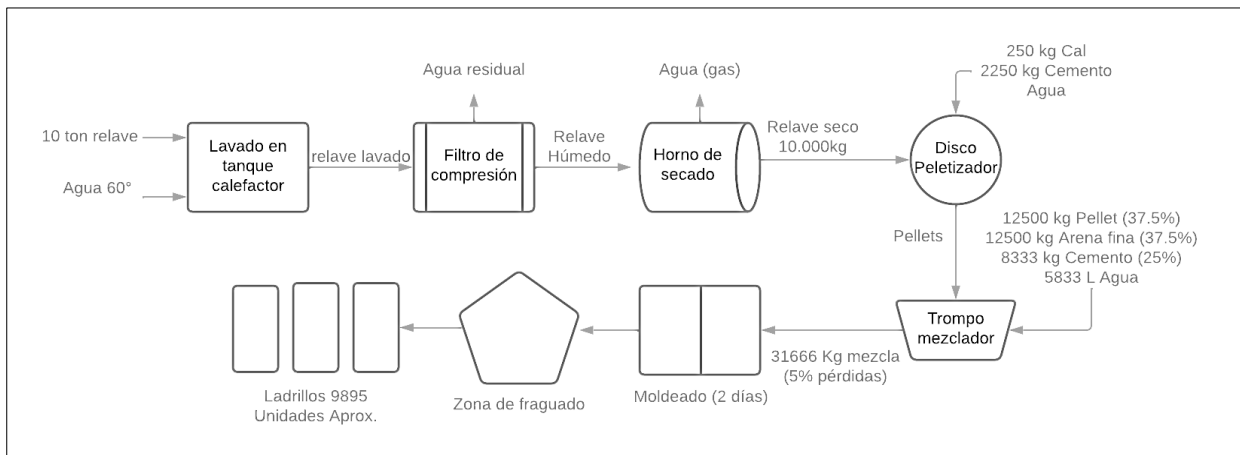
Para realizar el ensayo de compresión del ladrillo primero se tienen en cuenta las pruebas de hidratación basados en la NTC 4017, la cual indica que los ladrillos deben tener un peso mayor a 250 g , se secan a una temperatura entre 110-115°C (24 horas).Se registra el peso y a las 2 horas se pesa nuevamente, la diferencia de estos pesos no debe sobrepasar 0,2%. Se dejan enfriar, después se sumergen en agua (24 horas). Al pasar el tiempo se elimina el exceso de agua con un paño húmedo y se registra su peso.

Para la fabricación del ladrillo, se realizó un esquema de balance considerando una base

de cálculo a partir de 10 toneladas de relave, esto en modo de proyección para fabricación de estos en una planta a gran escala, para este proyecto los cálculos fueron tomados del balance a escala con 10kg de relave, utilizando la mezcla 2 de la Tabla 1. Se tuvieron en cuenta los siguientes porcentajes: relave (37.5%), arena fina (37.5%), cemento (25%), y agua. El proceso realizado, junto con el balance de masa se ilustra a continuación en la figura 1.

Figura 1.

Esquema de fabricación ladrillo sustituyendo arena fina en un 50% por relave.



3.1.3. Prototipar

En esta fase, se implementó un montaje experimental para llevar a cabo pruebas ambientales, sometiendo tanto el ladrillo como el relave minero a diversas condiciones en entornos agresivos. Utilizamos siete recipientes plásticos cortados por la mitad para contener líquidos como agua potable, lluvia ácida y lluvia smog, imitando así los ambientes potenciales durante la vida útil de los ladrillos. Estos recipientes, ubicados a una altura específica, permitieron un goteo constante hacia botellas plásticas en la parte inferior. Dichas botellas contenían el relave minero y

los ladrillos, se pesaron 80g para todas las muestras y se simuló el sistema de goteo durante 24 horas, todos equipados con un filtro de media velada para evitar el paso de material particulado al lixiviado final.

Figura 2.

Montaje de embudo, pesaje del relave, Sistema de simulación lluvia (goteo), llave de paso.

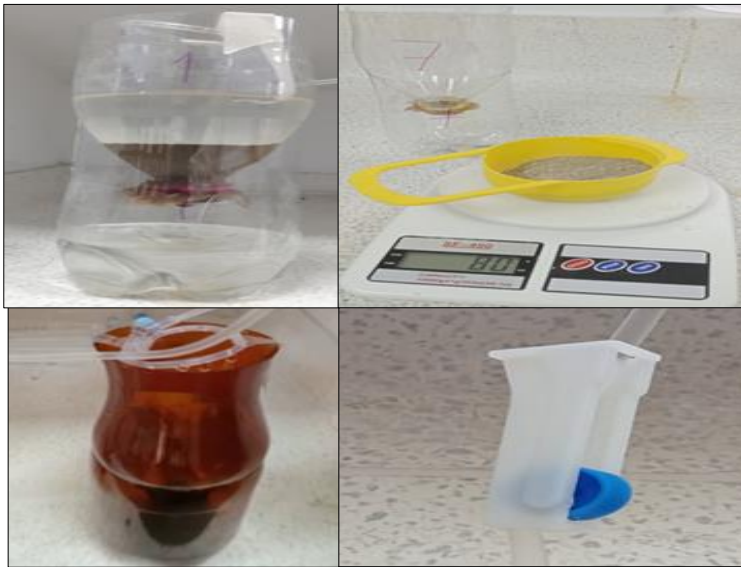
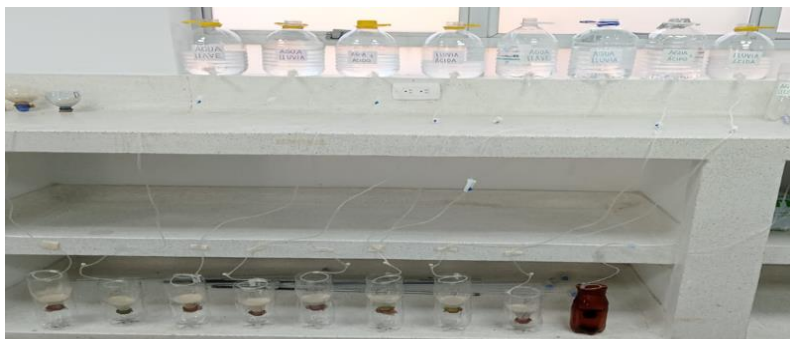


Figura 3.

Montaje general para ensayos de calidad ambiental.



El montaje general para ensayos de calidad ambiental se distribuye de la siguiente manera:

Muestra 1: Agua potable (Relave).

Muestra 2: Agua lluvia smog (Relave).

Muestra 3: Agua + Ácido (Relave).

Muestra 4: Agua potable (Ladrillo pulverizado).

Muestra 5: Agua lluvia smog (Ladrillo pulverizado).

Muestra 6: Agua + Ácido (Ladrillo pulverizado).

Muestra 7: Agua lluvia (Ladrillo).

3.1.4. Probar

El análisis de calidad ambiental se lleva a cabo con el propósito de contrastar los resultados obtenidos basados en los parámetros de la norma 0631 de 2015, que establece los límites permitidos para los parámetros que se miden en los vertimientos. Se realizan muestreos de metales pesados, compuestos de nitrógeno, sulfatos, resistividad, conductividad los cuales indican la presencia de los materiales que componen la muestra del ladrillo y sus concentraciones.

Además, se lleva a cabo la prueba ABA para medir el potencial de generación ácida, basada en el equilibrio entre los componentes de la muestra potencialmente generadores de ácido y los componentes neutralizantes de ácidos.

El procedimiento requerido para la medición de los parámetros mencionados se realizó un lavado en cada sonda con agua destilada, se encendió el equipo e insertó la sonda en la botella, seguido de esto se oprimió el botón de leer. Después se tomó el dato arrojado, se retiró la sonda y fue lavada con agua destilada. Esto se realizó con cada una de las botellas que contenían las diferentes sustancias a las cuales fue expuesto el relave y ladrillo.

- Nitratos, nitritos: Colorímetro multiparamétrico DR900 HACH.

Para estas mediciones se hizo uso de dos celdas, en una se le agregaron 10ml de muestra y en la otra agua potable la cual sirvió como blanco o cero. En el equipo se buscó cada uno de los parámetros y se puso la celda de blanco en el compartimiento de la celda y se oprimió la tecla de cero. Después se retiró de la celda de blanco y se introdujo la celda con la muestra a su vez se cubrió con el escudo para la luz. Se oprimió la tecla de leer y por último se registraron los resultados obtenidos para cada muestra y parámetro.

- Metales pesados:

BLANCO:

- a) Se tomó con una pipeta 10 ml de agua destilada, y se agregó en una celda.
- b) Luego se agregó a la celda un sobre de reactivo para Aluminio, se tapó la celda y se agitó.
- c) Se puso la celda con el blanco en el colorímetro DR 900, se tapó con el cobertor y se oprimió el botón Cero.
- d) Se esperó a que calibrara y se extrajo la celda

MUESTRA:

- a) Con una pipeta se tomó 10 ml de solución lixiviado y se agregó a una celda.
- b) Se agregó a la celda un sobre de reactivo para Aluminio, se tapó y se agitó.
- c) Se secó la celda por fuera y se introdujo en el colorímetro DR 900 programado para leer aluminio, se puso el cobertor y se oprimió el botón leer.

Cuando colorímetro presenta +++ indica que resultado es mayor que el rango que el equipo puede leer, por lo que se debe realizar una dilución a las muestras. Para el caso del aluminio, inicialmente se realizó una disolución 1:10 es decir, 9ml de agua destilada y 1 ml de muestra del lixiviado, en caso de que los resultados sigan siendo altos se debe volver a hacer una dilución 1:100, al final lo obtenido se debe multiplicar por 10 o 100 respectivamente.

Las muestras se diluyeron de la siguiente manera:

En el aluminio la muestra 1 se realizó una dilución 1:100 mientras que en la 2 y 3 se les hizo una 1:10, por último, las 5, 6 y 7 no fue necesaria la dilución.

Para el caso del cobre, hierro, zinc y cromo ninguna de las muestras necesitó dilución.

- Prueba ABA

Metodología de medición de PN para Test ABA modificado, (Usher et al., 2003).

Se pesaron 2 gramos de ladrillo pulverizado (80% bajo malla 200, norma ASTM), que se ubicaron sobre una lámina de papel de aluminio. Se vertieron algunas gotas de HCl al 25% sobre

la muestra y se observó el grado de reacción al contacto con el ácido o "Fizz Rate" (tasa de efervescencia) (Ver tabla 4).

Tabla 4.

Volumen en función del Fizz Rate.

Fizz Rating	Volumen de HCL 1N (ml) a adicionar	
	[t = 0 horas]	[t = 2 horas]
None	1	1
Sligth	2	1
Moderate	2	2
Strong	3	2

1. Después, se separaron aproximadamente 2 gramos de muestra pulverizada y se disponen en un vaso de precipitado, adicionando 90 ml de agua destilada para formar una pulpa.
2. (t=0 horas) cuando se inició la prueba se añadió un volumen de HCl 1N al recipiente que contiene la pulpa con la muestra, según se indica en la Tabla en función del Fizz Rate asignado en el primer paso.
3. El recipiente con la solución se ubicó sobre un agitador magnético a temperatura ambiente y cuando pasaron 2 horas (t=2 horas) se adiciona nuevamente el volumen de HCl 1N indicado por la misma clasificación.
4. Seguido, se ubicó el recipiente con la solución sobre un agitador magnético a temperatura ambiente y se dejó allí por 22 horas.

5. [t=22 horas] el pH de la solución se midió. Si es mayor a 2.5 adicionar nuevamente una cantidad controlada de HCl 1N hasta que el pH se estabilice en el rango entre 2.0 y 2.5. Si el pH medido está bajo 2.0, significa que se adicionó demasiado ácido en el paso 4, por lo que la prueba debe repetirse adicionando una menor cantidad inicial de HCl.

6. [t=24 horas) Se adiciona a la solución resultante un volumen medido de agua destilada hasta completar 125 ml en total. Se tomó registro del pH procurando que se mantenga en el rango indicado previamente (2.0-2.5), mediante adición de una nueva cantidad controlada de HCl 1N en caso de ser necesario.

7. Se realizó una titulación de la solución obtenida mediante la adición de una cantidad controlada de NaOH 0,1N, midiendo el pH hasta alcanzar un valor aproximado de 8.3. finalmente calcular el potencial de neutralización según la fórmula dada.

4. Resultados y discusiones

Durante el proceso de filtración, se observó que el filtrado en el relave con tratamiento fue más lento que el filtrado en el ladrillo pulverizado debido a que el ladrillo posee otros componentes, lo que le confiere una porosidad en la mezcla y hace que el flujo sea más rápido.

Para el análisis de pH, se tuvieron en cuenta principalmente las muestras que contienen agua de lluvia y smog (muestras: 2, 5, 7) (Ver Tabla 6 y figura 5), realizando la comparación con la normativa con el fin de evidenciar que el ladrillo a base de relave no producirá problemas en la salud humana ni en el medio ambiente al exponerse a dicho ámbito.

La lluvia, al estar en contacto con el ladrillo, puede arrastrar elementos contaminantes, y esta se drenará por escorrentía hacia las alcantarillas. Por lo tanto, se tomó como base el capítulo 5 de la resolución 0631 de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo, donde se establecen los límites máximos permitidos para los vertimientos en el alcantarillado público.

4.1. Datos obtenidos pruebas de hidratación

Tabla 5.

Resultados prueba de hidratación.

MEZCLAS	ARENA FINA POR RELAVE 10%	ARENA FINA POR RELAVE 50%	ARENA FINA POR RELAVE 90%	CEMENTO POR RELAVE 10%	CEMENTO POR RELAVE 50%
Peso de inmersión	484,4	461,8	449,4	450,6	450
Peso después de secado	448,2	423,8	412,8	417,2	423
Peso a las 2 horas	448,1	423,8	412,8	417,7	422,8
Peso después inmersión	516	495,7	497	479,6	492

4.2. Datos obtenidos ensayo resistencia a la compresión**Tabla 6.****Resultados resistencia a la compresión de los ladrillos.**

PROPORCIÓN MEZCLA (%)	PESO (G)	RESISTENCIA (MPA)
10%	3216	10.3
50%	3206	14.97
90%	3135	12.92

Mezclando 50% de residuos mineros se obtiene una resistencia a la compresión de 14.97 Mpa, lo cual según la norma NTC 4026 para ladrillos es 13 Mpa.

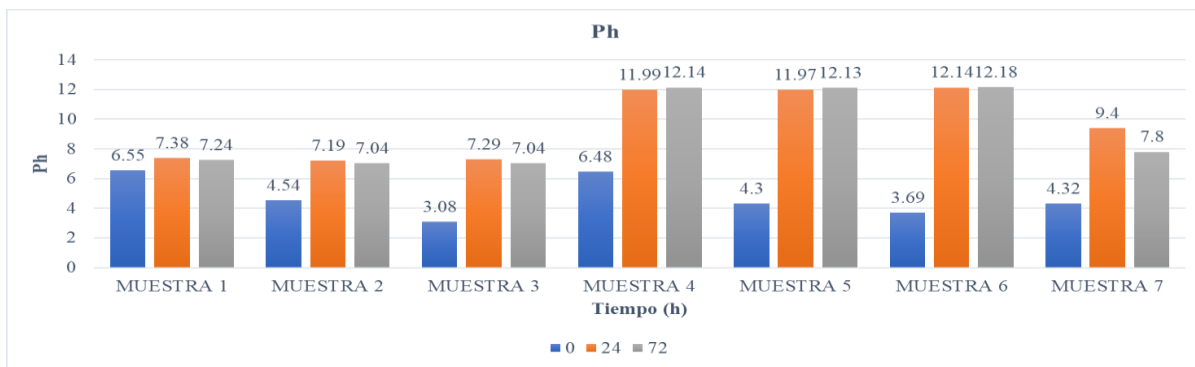
4.3. Datos obtenidos pH:**Tabla 7.****Registro promedio de datos pH de las muestras.**

pH	0	24	72
MUESTRA 1	6.55	7.38	7.24
MUESTRA 2	4.54	7.19	7.04
MUESTRA 3	3.08	7.29	7.04
MUESTRA 4	6.48	11.99	12.14
MUESTRA 5	4.3	11.97	12.13

MUESTRA 6	3.69	12.14	12.18
MUESTRA 7	4.32	9.4	7.8

Figura 4.

Promedio datos pH de las muestras.



4.4. Comparación de la resolución 0631 de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, con los resultados obtenidos:

Según la resolución 0631 de 2015, el límite permitido de pH para vertimientos es de 6,00 a 9,00. Al realizar la comparación, se evidencia que las muestras 4, 5, 6 presentan un pH básico alcalino debido a su medio filtrante, que incluye principalmente cemento y cal, lo que hace que estas muestras se transformen en sustancias básicas.

Por otro lado, las muestras 1, 2, 3, 7 (Ver tabla 6 y figuras 5) se encuentran dentro del rango permisible, es decir, que el ladrillo final es apto para su uso, ya que no eleva el pH por encima del rango establecido en la resolución.

4.4.1. Datos obtenidos de conductividad:

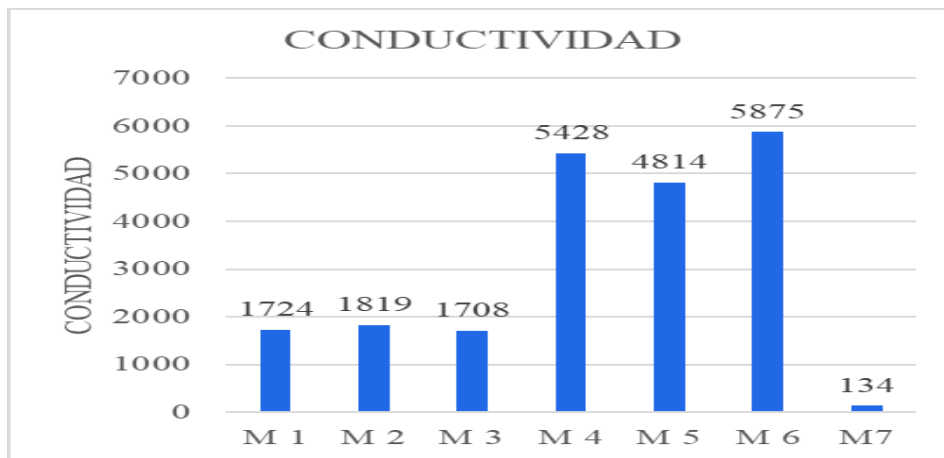
Tabla 8.

Registro promedio datos conductividad de las muestras.

CONDUCTIVIDAD	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M7
PROMEDIO	1724	1819	1708	5428	4814	5875	134

Figura 5.

Promedio datos conductividad de las muestras.



4.5. Comparación con la resolución-1256 de 2021 del ministerio de ambiente de desarrollo sostenible, con los resultados obtenidos:

Tabla 9.

Límites permisibles de aguas residuales.

PROMEDIO	0.0006	0.00053	0.0006	0.0002	0.0002	0.0002	0.0075
-----------------	--------	---------	--------	--------	--------	--------	--------

Figura 6.

Promedio datos de resistividad de las muestras.



4.5.2. Datos obtenidos de Nitratos:

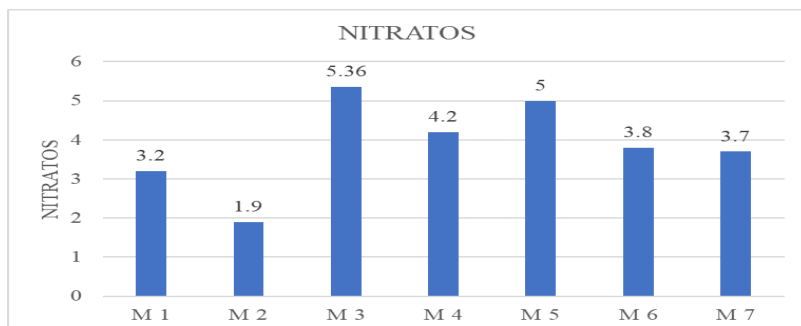
Tabla 10.

Registro promedio datos Nitratos de las muestras.

NITRATOS (ppm)	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7
PROMEDIO	3.2	1.9	5.36	4.2	5	3.8	3.7

Figura 7.

Promedio datos nitratos de las muestras.



4.6. Comparación con la resolución-1256 de 2021 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, con los resultados obtenidos:

La figura 7, que muestra los valores límites permisibles para vertimientos de aguas residuales, indica que el valor máximo permisible es de 11,00 mg/L, lo que equivale a 11,0 ppm. Según los resultados obtenidos de nitratos (ppm), se encuentran por debajo del rango establecido, garantizando así la calidad del vertimiento.

4.6.1. Datos obtenidos de Nitritos:

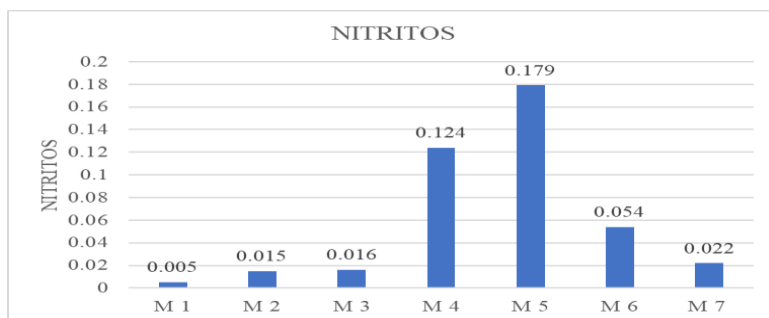
Tabla 11.

Registro promedio datos Nitritos de las muestras.

NITRITOS(NO ₂ ⁻)	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7
PROMEDIO	0.005	0.015	0.016	0.124	0.179	0.054	0.022

Figura 8.

Promedio datos nitritos de las muestras.



4.7. Comparación de la resolución 0631 de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, con los resultados obtenidos:

En los parámetros establecidos según la resolución, no presentan un límite predeterminado, ¡solo se lee “ANÁLISIS Y REPORTE! Aun así, se solicita el reporte, el cual se encuentra registrado en los resultados obtenidos.

Comparación con la resolución 2115 de 2007(mayo 9) del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial y ministerio de protección social, con los resultados obtenidos de nitratos y nitritos:

Figura 9.

Características químicas del agua que tienen implicaciones sobre la salud humana.

Cuadro N°. 3 Características Químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	COT	5,0
Nitritos	NO ₂ ⁻	0,1
Nitratos	NO ₃ ⁻	10
Fluoruros	F ⁻	1,0

Para la salud humana, los datos arrojados de nitratos, con un 3,7 mg/L, y nitritos con un 0,022 mg/L, se encuentran favorables y no tendrán implicaciones sobre la salud.

4.7.1. Datos obtenidos sulfatos

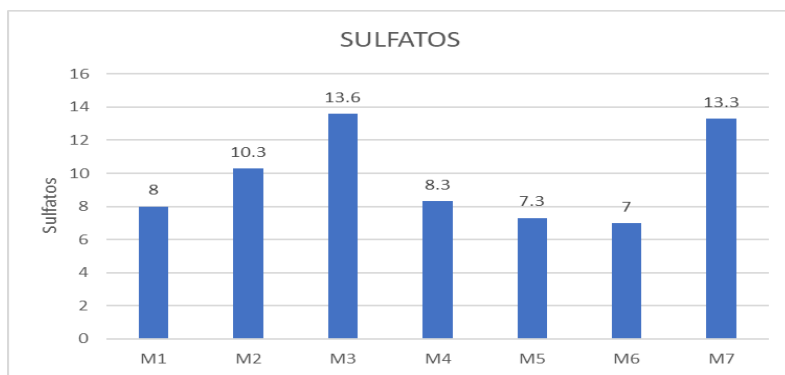
Tabla 12.

Registro promedio de datos de sulfatos de las muestras.

SULFATO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
PROMEDIO	8	10.3	13.6	8.3	7.3	7	13.3

Figura 10.

Promedio datos sulfatos de las muestras.



4.8. Comparación de la resolución 0631 de 2015 con los resultados obtenidos.

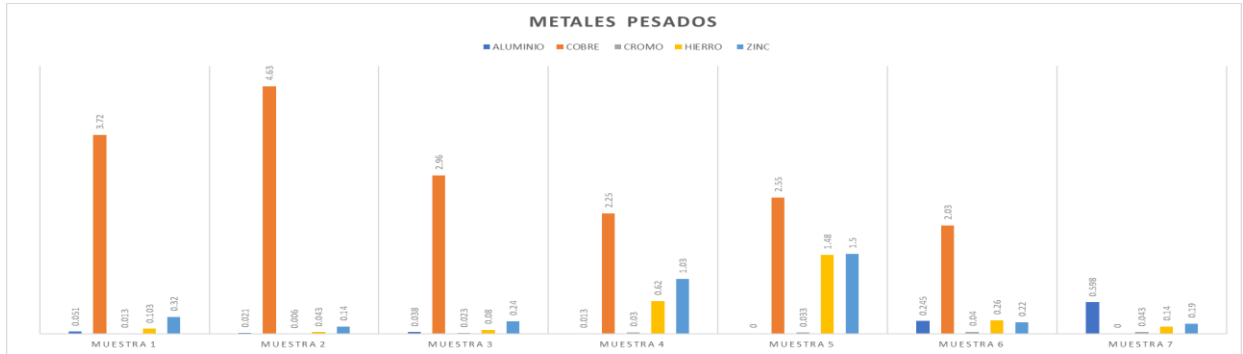
En los parámetros establecidos según la resolución, no presentan un límite predeterminado.

Se registran los resultados obtenidos.

4.8.1. Datos obtenidos metales pesados**Tabla 13.****Registro promedio datos y Metales pesados de las muestras.**

METAL	ALUMINIO	COBRE	CROMO	HIERRO	ZINC
MUESTRA 1	0.051	3.72	0.013	0.103	0.32
MUESTRA 2	0.021	4.63	0.006	0.043	0.14
MUESTRA 3	0.038	2.96	0.023	0.08	0.24
MUESTRA 4	0.013	2.25	0.03	0.62	1.03
MUESTRA 5	0	2.55	0.033	1.48	1.5
MUESTRA 6	0.245	2.03	0.04	0.26	0.22
MUESTRA 7	0.598	0	0.043	0.14	0.19

Figura 11.**Promedio datos metales pesados de las muestras.**



4.9. Comparación con el procedimiento EPA 200.7(ICPOES) & 200.8 (ICPMS) con los resultados obtenidos.

- **Aluminio:** En la resolución se tiene en cuenta el aluminio como parámetro, pero no posee un límite permisible definido. Por lo tanto, se realiza el registro de los resultados obtenidos.
- **Cobre:** El procedimiento EPA nos indica un límite permisible de 0,50 mg/L. Las muestras realizadas con relave con tratamiento y ladrillo pulverizado presentan valores mayores al permitido debido a que el material filtrante es polvo y libera el metal de manera más fácil. La muestra final, que pertenece al ladrillo fabricado, no posee cobre ya que el trozo de ladrillo contiene el metal y no se libera al medio ambiente.
- **Cromo:** El procedimiento EPA nos indica un límite permisible de 0,1 mg/L. Ninguna de las muestras posee un contenido de cromo superior al permisible. Además, el resultado obtenido de la muestra 7, perteneciente al producto final (ladrillo), no desprende una cantidad relevante de metal, lo cual beneficia su uso.

- Hierro: El procedimiento EPA indica un límite permisible de 2 mg/L. Se evidencia que todas las muestras son óptimas y se encuentran por debajo del límite establecido.
- Zinc: El procedimiento EPA indica un valor permisible de 1.5 mg/L. De los resultados obtenidos, la muestra 5 posee un contenido de zinc en el límite máximo permisible, mientras que las demás muestras se encuentran con un contenido de zinc inferior.

4.9.1. Resultados prueba ABA

Resultados del PA (Potencial de acidez).

Figura 12.

Criterio de interpretación para los resultados de la prueba ABA.

Potencial representado	Criterio de interpretación	
Bajo o Nulo Potencial de Generación de Ácido	$PNN > 20$	$PN/PA > 3$
Potencial Marginal de Generación de Ácido	$PNN < 20$	$1 < PN/PA < 3$
Alto Potencial de Generación de Ácido	$PNN < 0$	$PN/PA < 1$

Con el fin de interpretar los resultados de manera correcta, se debe tener en cuenta que todo el azufre en una muestra reacciona para formar ácido. Además, la determinación del potencial de acidificación (PA) se calcula basándose en análisis del azufre total y su presencia como sulfato, lo que permite conocer la cantidad de azufre presente como sulfuro, que sirve como base para el cálculo del PA.

Tabla 14.

Registro concentración de azufre en ladrillo pulverizado.

Muestra		LADRILLO PULVERIZADO
Porcentaje cuantitativo en óxidos y elemental (FRX)		
Elemento	Concentración	
S	0,43%	

Resultados de PN (Potencial de neutralización)

- (t= 0) 3:45pm 2 ml HCL 1N
- (t= 2) 5:45pm 3 ml HCL 1N
- (t= 22) 1:45 pm se midió el pH de la pulpa y estaba en 11,46. Para acidificar el pH, se agregaron 40 ml de HCL 1N, y luego 0,6 ml de HCL al 12N, llegando a un pH de 2,32.
- (t=24) 3:45pm se midió el pH de la pulpa el cual estaba en 2,47. Para realizar la titulación se añadieron 14 ml de NaOH 0,1N llegando a un pH de 8,33.

$$PN = \frac{(N \times Vol (ml) de HCL) - (N \times Vol (ml) de NaOH) \times 50}{Peso de la muestra (g)} \quad (1)$$

donde,

 PN = Potencial de neutralización.

$N = \text{Normalidad}$

$$PN = \frac{(36.63N/L \times 40.6ml \times 1L/1000ml) - (0.1N/L \times 14ml \times 1L/1000ml) \times 50}{2g}$$

$$PN = 0,708589 \text{ mol/g}$$

Tabla 15.

Porcentajes de abundancia del análisis FRX.

Muestra	Relave sin tratamiento
Nombre	Cuantitativo
Cuarzo	57.90%
Alunita	16.80%
Moscovita	11.20%
Ilita	7.20%
Enstatita, férrica	2.00%
Goosecreekita	1.50%
Sulfato de calcio (CaSO₄)	1.20%
Caolinita	1.10%
Broquita	<1%
Dióxido, férrico	<1%

Pirita	<1%
---------------	-----

Para poder determinar el potencial de acidificación, es necesario conocer el azufre total y el azufre presente como sulfato. Para ello, se hizo uso de los resultados obtenidos del proceso FRX, que arrojó un porcentaje de azufre del 4.48% total, junto con los sulfatos de la tabla 14.

$$\text{Azufre total y como sulfato} = 1.2\% + 1\% + 0.43\% + 1.08\% + 4.48\% = \mathbf{8.9\%}$$

$$PN/PA = 0,708589 / 8.9 = 0,086518$$

Este valor obtenido corresponde al potencial de acidificación (PA), que es importante para poder calcular el potencial neto de neutralización que determina si existe o no potencial de generación ácida, que es el objetivo principal de la prueba ABA, mediante la siguiente ecuación.

$$PN - PA = PNN \tag{2}$$

Reemplazando los valores se tiene que:

$$PNN = 0,708589 - 8,19 = - 7,481411$$

Figura 13.

Porcentaje cuantitativo en óxidos y elemental (FRX).

Porcentaje cuantitativo en óxidos y elemental (FRX)			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Si	30,54%	SiO2	65,34%
Al	8,83%	Al2O3	16,68%
K	3,32%	K2O	3,99%
Fe	1,61%	Fe2O3	2,31%
Ca	0,93%	CaO	1,31%
S	0,43%	SO3	1,08%
Mg	0,41%	MgO	0,68%
Ti	0,30%	TiO2	0,50%

Al comparar estos valores de PNN y PN/PA obtenidos con la figura 14, se pudo observar que la muestra presenta un alto potencial de generación de ácido. Este comportamiento es común en muestras que contienen un alto contenido de azufre total y la presencia de sulfuros, que generalmente se asocia como la principal razón de la generación de ácidos.

Es importante mencionar que durante la realización de la prueba ABA, después de 22 horas, el pH se encontraba en un nivel básico de 11.46. La prueba requería que el pH estuviera dentro del rango de 2.0 a 2.5, por lo que se tomó la decisión de agregar una cantidad de HCL a 1N. Después de añadir 40 ml de ácido, no se observaron cambios significativos, ya que, al alcanzar un punto mínimo, el pH volvía a subir, manteniéndose constante en 6. En este punto, se decidió agregar 0.6 ml de HCL al 37%, logrando así llegar al rango requerido. Finalmente, se pudo analizar y entender que este fenómeno se debía a que el cemento reacciona junto con el ácido, lo que hace que el pH alcance un valor máximo y, cuando cesa la reacción, vuelve a volverse alcalino. Por lo tanto, fue necesario romper esta barrera para mantener un pH constante dentro del rango establecido.

5. Conclusiones

En el proceso de fabricación de ladrillos, se determinó que existen parámetros importantes a considerar. Uno de ellos es el tratamiento necesario que debe aplicarse al relave antes de su uso para eliminar todos los agentes químicos presentes. Además, se debe tener en cuenta la cantidad de arena fina o cemento que se va a sustituir. Por ejemplo, en casos en los que se sustituye el 90% del cemento por relave, los ladrillos pueden no lograr solidificarse adecuadamente. Por último, es esencial siempre considerar las normativas que regulan la fabricación de ladrillos.

Los resultados obtenidos en la prueba ABA clasifican la muestra como un alto potencial de generación de ácido. Sin embargo, es importante destacar que esta prueba fue realizada en una muestra de ladrillo pulverizado. Los ladrillos macizos, gracias al proceso de encapsulación durante la peletización y fabricación, evitan la generación de ácido. Estos resultados se confirman con las pruebas de pH realizadas en los trozos de ladrillo.

Los resultados obtenidos a lo largo de la prueba de toxicidad, incluyendo la concentración de metales pesados y otras pruebas realizadas al compararse con la resolución 0631 del 2015 y las normativas nacionales, demuestran que los ladrillos cumplen con los límites establecidos por dicha norma y se encuentran dentro de los rangos permisibles de la misma.

6. Recomendaciones

La prueba ABA fue realizada para el ladrillo obtenido (con tratamiento), sin embargo, se recomienda realizar otro tipo de pruebas químicas y ambientales que permitan la recolección de datos con el fin de complementar y predecir de una mejor manera la generación de ácido.

Es bien sabido que se pueden presentar distintos ambientes como los simulados en este trabajo, sin embargo, pueden existir otros factores como la temperatura que pueden llegar a afectar, por lo tanto, se recomienda realizar este tipo de pruebas variando este factor con el fin de determinar si puede llegar a representar un riesgo.

Referencias Bibliográficas

Anicama Acosta, Gerson Alfredo. (2010) *Estudio experimental del empleo de materiales de desecho de procesos mineros en aplicaciones prácticas con productos cementicios (Tesis de Ingeniería) Lima: PUCP*

Aramburo, M. A., Olaya, Y. (2012). *Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. Gestión y ambiente, 15(3), 125-133.*

ASTM American Society for Testing and Materials (2017). *Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone ASTM C170/C170M-17. Disponible en: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0170_C0170M-17%7Cen-US*

ASTM American Society for Testing and Materials (2022). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units ASTM C140/C140M.*

Barreda, Aguilar, Cueva (2012). *Desarrollo de un Prototipo para la Fabricación de Ladrillos de Construcción a partir de la Utilización de Relaves Mineros del Proceso de Cianuración en Plantas Minero Artesanales. Instituto de Energía y Medio Ambiente. Recuperado de: <http://ucsp.edu.pe/investigacion/el-iem-ucsp-ha-presentado-un-proyecto-para-lafabricacion-de-ladrillos-a-partir-de-reutilizacion/>*

Cárdenas Ticlavilca, “*Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de unidades de albañilería - caso ex unidad minera Mercedes 3,*” *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú, 2019. doi: <https://doi.org/10.19083/tesis/625225>*

CIMM T & S S.A. Área Consultoría Ambiental Sede Vitacura. Aplicación de test SPLP, *test ABA y evaluación de generación neta de acidez a muestras de geología de compañía minera del pacífico*. http://www.plataformacaldera.cl/biblioteca/589/articles-64610_documento.pdf

Díaz, L. L. (2023, 15 marzo). *La producción legal del oro alcanza el 40 por ciento del total nacional*. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/este-es-el-panorama-de-la-mineria-ilegal-para-el-2023-750302>

EPA de EE. UU. 1994. “*Método 200.7: Determinación de metales y oligoelementos en agua y desechos mediante espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente*”, Revisión 4.4. Cincinnati, Ohio, EE.UU.

EPA de EE. UU. 1994. “*Método 200.8: Determinación de oligoelementos en aguas y desechos mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente*”, Revisión 5.4. Cincinnati, Ohio, EE.UU.

https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0140_C0140M-22B%7Cen-US.

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>

ICMM & bullet. (2022). *Recuperar, reutilizar, reciclar*.

INFORME TÉCNICO DE RESULTADOS (FRX, DRZ Y SEM) GUATIGUARÁ

Juliet Montes Fajardo, C., Jahir Rojas Rodriguez, B., & Pedro Luis Delvasto Angarita, C. (n.d.).

OBTENCIÓN DE CONCRETO A PARTIR DE RELAVES I Obtención de concreto a partir del reuso de relaves de flotación de minerales polimetálicos de California Santander.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Resolución 2115 - 2007 | MinVivienda.* (s. f.).

<https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>

Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Estandarizar los procesos relacionados con presas de relaves.*

Ministerio de Minas y Energía-ATG LTDA (2020). *Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería.*

Noticias Parlamento Europeo (2023). *Economía circular: Definición, importancia y beneficios.*

Pardavé Livia, W. (2022). Ensayos de calidad ambiental de un ladrillo de construcción, obtenido a partir de mezclas que incluyen relaves de flotación de minerales polimetálicos. Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 25(50), 471–479. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.23858>

Resolución 1256 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021).

Resolución 631 de 2015 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>

Reyes, C. A. R., Livia, W. P., & Galvis, C. S. (2020). *Estudio geo metalúrgico del beneficio del oro en un depósito mineral en la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos. Revista Científica Geo Latitud, 3(2), 2-12.*

Universidad de Azuay. Luis Alexander Songor Carrion. *Estudio del mecanismo de generación de drenaje ácido en materiales de concentración del Proyecto Rio Blanco.*
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9623/1/15256.pdf>

Universidad Internacional de Andalucía. Paula Martínez Ramírez. *Protocolo de caracterización para la predicción de drenaje ácido en depósitos de relaves mineros.*
https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3932/0888_Martinez.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Universidad Nacional de Colombia (2018). *Emerging technologies for tailings disposal: opportunities for Colombian practice.*

Apéndices

Apéndice a. Toma de fosfatos, nitratos, sulfatos

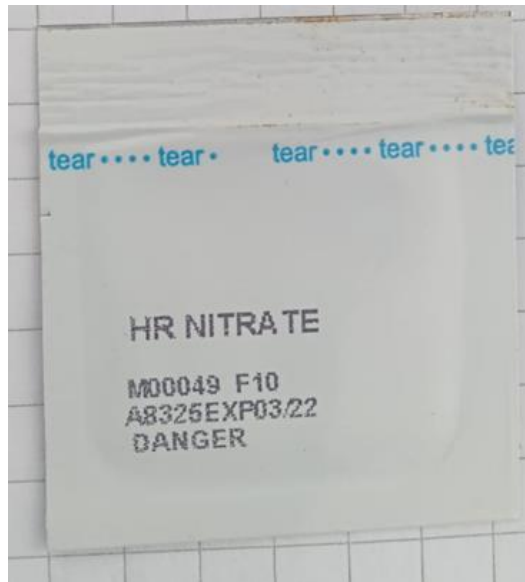
Reactivo para fosfatos.



Medición de fosfatos en el DR900.



Reactivo para nitratos.



Medición de nitratos en el DR900.



Kit de medición del DR900 metales pesados.



Celdas con dilución de metales.

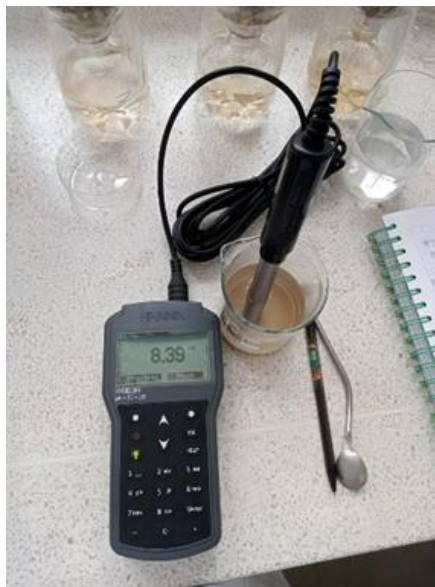


Kit de medición del DR900 metales. Celdas y reactivo.



Apéndice c. Toma prueba ABA

Medición de pH luego de agregar el NaOH 0,1N.



Muestra en el agitador magnético.



Reacción del ladrillo pulverizado luego de agregar HCL 25%.



Ladrillos obtenidos con reemplazo 50% por relave.

