

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
ELABORACIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA PERFORADA DE
CONCRETO UTILIZANDO RELAVES PROVENIENTES DE LA MINERÍA DE
AGREGADOS**



Por:
Andrea Maryory Cerón Cerón
Carolina Gutiérrez Arango



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2019**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
ELABORACIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA PERFORADA DE
CONCRETO UTILIZANDO RELAVES PROVENIENTES DE LA MINERÍA DE
AGREGADOS**



Por:
Andrea Maryory Cerón Cerón
Carolina Gutiérrez Arango

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional
de ingeniero civil

Aprobado por:
Ing. Geovanny González Maldonado, MSc.
Director

Geo. Oscar Enrique Forero Ospino, MG.
Codirector

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2019

Nota de aceptación

JHON JAIRO GIL PELÁEZ.
Decano Facultad Ingeniería Civil

GEOVANNY GONZÁLEZ MALDONADO.
Director Trabajo de Grado

BREGY HASSLER CHOQUE JIMÉNEZ.
Jurado

Villavicencio, agosto de 2019.

DEDICATORIA.

A nuestras familias, quienes de manera incondicional nos han brindado su apoyo y amor, enseñándonos a perseverar aun cuando la situación pareciese no tener una salida y a trabajar incansablemente por la realización de nuestros sueños y metas.

AGRADECIMIENTOS.

A la facultad y aquellas empresas que pusieron a nuestra disposición los espacios e información necesaria para la realización de este proyecto; y a todas aquellas personas que directa e indirectamente nos brindaron su apoyo tanto académico como emocional. Docentes, familiares y directivos, gracias infinitas por su confianza.

RESUMEN

La explotación de los recursos minerales es uno de los principales ejes de la economía a nivel mundial y va de la mano con el desarrollo social. Sin embargo, esta actividad genera a su vez cantidades considerables de desechos mineros llamados relaves, los cuales, de no recibir un tratamiento adecuado pueden convertirse fácilmente en pasivos ambientales. Por lo tanto, el presente proyecto de investigación propone el uso de relaves provenientes de la minería de agregados, en la elaboración de unidades de mampostería perforada de concreto como reemplazo porcentual del cemento, evaluando el comportamiento físico de 4 diseños de mezcla con diferentes porcentajes de reemplazo. El proyecto consta de 4 fases metodológicas que contemplan la caracterización fisicoquímica del relave, el diseño de mezclas, el análisis del comportamiento mecánico de las mezclas con reemplazo por medio de ensayos de resistencia a la compresión y absorción de agua, y un análisis económico que define el porcentaje de ahorro que representa cada reemplazo de cemento por relave en el costo total del bloque.

En general, y de acuerdo con los resultados de los ensayos realizados, los 4 diseños de mezcla con reemplazos presentaron un buen desempeño mecánico, alcanzando en la mayoría de los casos más del 90% de la resistencia del diseño patrón y disminuyendo en hasta un 34% el porcentaje de absorción de los bloques, además de representar un ahorro hasta del 41% en el coste de producción por bloque.

Palabras Clave: Relaves, minería, impacto ambiental, unidad de mampostería estructural.

ABSTRACT

The exploitation of mineral resources is one of the main axes of the economy worldwide and goes hand in hand with social development. However, this activity also generates considerable amounts of mining waste, which, if not properly treated, can easily become environmental passives. Therefore, this research project proposes the use of mining aggregates tailings, in the elaboration of units of perforated concrete masonry as a percentage replacement of the cement, evaluating the physical behavior of 4 mix designs with different percentages of replacement. The project consists of 4 methodological phases that contemplate the physicochemical characterization of the tailings, the design of mixtures, the analysis of the mechanical behavior of the mixtures with tailings replacement through tests of compressive strength and water absorption, and an economic analysis that defines the percentage of savings represented by each replacement of cement per tailings in the total cost of the block.

In general, and in accordance with the results of the tests carried out, the 4 mixtures designs with replacements showed a good mechanical performance, reaching in most cases more than 90% of the resistance of the standard design and decreasing by up to 34% the percentage of absorption of the blocks, besides representing a saving up to 41% in the cost of production per block.

Key Word: *Environmental impact, mining, structural masonry unit, tailings.*

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
3.	JUSTIFICACIÓN	13
4.	OBJETIVOS	14
4.1.	OBJETIVO GENERAL.....	14
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
5.	ALCANCE	15
6.	MARCO DE REFERENCIA	16
6.1.	MARCO TEÓRICO.....	16
6.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	18
6.3.	ESTADO DEL ARTE	21
6.4.	MARCO NORMATIVO.....	26
6.5.	MARCO GEOGRÁFICO	28
7.	METODOLOGÍA.....	30
7.1.	ETAPA 1: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.	31
7.1.1	Obtención del material.	31
7.1.2	Caracterización química.....	31
7.1.3	Caracterización física.....	32
7.2.	ETAPA 2: DISEÑO DE MEZCLA Y ELABORACIÓN DEL BLOQUE.....	38
7.2.1	Diseño de mezclas de concreto.	38
7.3.	ETAPA 3: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y ABSORCIÓN DE AGUA.	40
7.4.	ETAPA 4: ANÁLISIS ECONOMICO DEL PROYECTO.....	41
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
9.	RESULTADOS E IMPACTOS	48
9.1.	IMPACTOS.....	48
10.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	50
10.1.	CONCLUSIONES.....	50
10.2.	TRABAJOS FUTUROS	50
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	51
	ANEXOS.....	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco Normativo del proyecto.....	26
Tabla 2. Análisis granulométrico por tamizado de la arena.	32
Tabla 3. Análisis granulométrico por hidrómetro del relave.	33
Tabla 4. Contenido de humedad del relave y la arena.	35
Tabla 5. Peso específico del relave y la arena.	35
Tabla 6. Límites de consistencia del relave.	36
Tabla 7. Cantidad de materiales requeridos por cada diseño de mezcla.....	38
Tabla 8. Resultados de la investigación.	48
Tabla 9. Descripción de los impactos esperados con el desarrollo del proyecto. .	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dimensiones del bloque de concreto H-12.....	19
Figura 2. Ubicación geografica del municipio de Villavicencio en el Departamento del Meta.	28
Figura 3. Ubicación relavera Mina Zafiro en el municipio de Villavicencio.	29
Figura 4. Esquema de la metodología empleada.	30
Figura 5. Curva granulométrica de la arena.	32
Figura 6. Tamizadora digital, utilizada en el ensayo de granulometría..	33
Figura 7. Juego de tamices despues de realizado el ensayo de granulometría de la arena.	33
Figura 8. Curva granulométrica del relave.....	34
Figura 9. Limpieza del hidrómetro en agua destilada antes de la siguiente lectura.	34
Figura 10. Lectura del hidrómetro + defloculante.	34
Figura 11. Primera lectura del hidrómetro.	34
Figura 12. Muestras de arena y relave secadas en el horno durante el ensayo de contenido de humedad de los suelos.	35
Figura 13 y Figura 14. Ensayo de limite liquido en la cazuela de Casagrande. ...	36
Figura 16. Ensayo de limite plástico.....	37
Figura 15. Equipos necesarios para realizar el ensayo de límites de consistencia..	37
Figura 17, Figura 18 y Figura 19. Maquina vibrocompactadora para elaborar bloques..	39
Figura 20. Relave después de pasar por el proceso de secado y zarandeo.....	39
Figura 21. Bloques H-12 con y sin reemplazo porcentual de cemento durante el proceso de fraguado..	39
Figura 22. Esquema del ensayo de la resistencia a la compresión para bloques de concreto.....	40
Figura 23 y Figura 24. Bloque patrón y bloque R50 después de realizado el ensayo de resistencia a la compresión.....	40
Figura 25. Resistencia a la compresión de las mezclas con reemplazo en relación con la resistencia de la mezcla patrón a los 7 días de curado.....	42
Figura 26. Absorción de agua de los bloques a los 7 días de curado.....	43
Figura 27. Resistencia a la compresión de las mezclas con reemplazo en relación con la resistencia de la mezcla patrón a los 14 días de curado.....	44
Figura 28. Absorción de agua de los bloques a los 14 días de curado.....	44
Figura 29. Resistencia a la compresión de las mezclas con reemplazo en relación con la resistencia de la mezcla patrón a los 28 días de curado.....	45
Figura 30. Absorción de agua de los bloques a los 28 días de curado.....	45
Figura 31. Porcentaje de ahorro de las mezclas con remplazo respecto al coste total de producción de la mezcla patrón por unidad de mampostería.	47

1. INTRODUCCIÓN

La minería, pese al impacto ambiental generado, sigue siendo uno de los sectores con mayor crecimiento a nivel mundial; lo que, en países ricos en yacimientos mineros como Colombia, se convierte fácilmente en uno de los principales motores económicos. Este fenómeno a su vez es impulsado de manera proporcional en relación con el sector de la construcción, al ser este último, uno de los sectores con más alta demanda de materiales de minas y cantera, debido a la necesidad generada a partir del acelerado crecimiento poblacional de las últimas décadas a nivel mundial.

Sin embargo, con el aumento en la extracción de materiales requeridos para construcción, también se aumenta de forma significativa los residuos generados por esta actividad en forma de relaves, que sin un tratamiento adecuado, ponen en riesgo el equilibrio del ecosistema de las áreas aledañas a la zona de extracción.

En búsqueda de mitigar el problema anterior, por medio de alternativas que satisfagan las necesidades de la sociedad y al mismo tiempo contribuyan con la preservación del ambiente, este proyecto de investigación propone el uso de los relaves de minería de agregados de la planta Zafiro, ubicada en la ciudad de Villavicencio – Meta, en la elaboración de unidades de mampostería perforada de concreto como reemplazo del cemento en diferentes porcentajes (10%, 20%, 30% y 50%), sometidas a ensayos físicos, químicos y mecánicos en distintas edades de curado.

Este documento se encuentra organizado en diferentes capítulos, donde se contempla: la revisión teórica y conceptual que sirve como fundamento a la investigación; la fase metodológica, en la que se plantean las etapas del proceso investigativo, en razón de alcanzar los objetivos planteados; el análisis de resultados obtenidos que verifique los criterios que validen la investigación, y otras observaciones pertinentes al estudio realizado.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las actividades mineras en los últimos años, han reflejado gran importancia en la economía colombiana, representando el 6.05% del PIB y el 54% de las exportaciones del país para el año 2017, de acuerdo a cifras dadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE [1]. No obstante, a pesar de su importancia económica, los daños causados en los ecosistemas de las áreas aledañas no solo en el momento de la extracción del mineral, sino también los residuos (relaves) generados después de este proceso, tienden a ser irreparables.

No en vano, proyectos como el de la mina de oro a cielo abierto “La Colosa”, en el municipio de Cajamarca, ha causado varias discusiones por los impactos ambientales generados en la zona, desde el comienzo de las actividades de exploración, hace más de 10 años [2]. Múltiples estudios e investigaciones generadas a partir de la ejecución de la obra, a manos de importantes geólogos como Julio Fierro, geólogo e investigador del Grupo Terrae, han advertido las consecuencias para los suelos, los ríos y el aire que tendría la explotación minera en la región, y el enorme riesgo presentado por la presa de relaves del proyecto, ubicada en zona con antecedentes de sismicidad, en la cuenca alta del río Coello [3].

En el caso de Villavicencio, la extracción de materiales de arrastre en los ríos que bajan de la cordillera, utilizados como insumo para la construcción de obras civiles, han ocasionado un auge de la minería en la ciudad, que, sin un adecuado control, generan serios daños ambientales, como la pérdida de grandes hectáreas de terreno a causa del desvío de los ríos, y la contaminación por el mal manejo de los residuos en los cuerpos de agua [4].

Buscando brindar una alternativa que contribuya con la mitigación de los problemas ambientales expuestos, se propone en esta investigación el estudio de 4 diseños de mezcla de concreto con diferentes reemplazos porcentuales (10%, 20%, 30% y 50%) del cemento por relave proveniente de la minería de agregados, con el fin de determinar por medio de los resultados arrojados por los ensayos de resistencia y absorción de agua en diferentes edades de curado ¿Cuál de las dosificaciones propuestas brindara mejores características mecánicas a las unidades de mampostería elaboradas con relaves, en relación con las unidades de mampostería perforada de concreto convencional?

3. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, según la Agencia Nacional de Minería alrededor del 57% de los títulos mineros existentes, son de extracción de materiales de construcción como arena, grava, piedras, gravilla, afirmado, arcillas o calizas; de los cuales en el departamento del Meta al año 2017 se encontraban vigentes 202 títulos de esta denominación, representando el 76,2% de las regalías de minerales [5]. Aunado a lo anterior, el alto crecimiento poblacional presentado en los últimos años, genera un incremento en la demanda de materiales provenientes de la extracción minera para suplir los diferentes proyectos de infraestructura que requiere la población.

Sin embargo, siendo la minería de agregados uno de los principales protagonistas en la economía nacional y regional, no es responsable dejar de considerar el impacto ambiental que se genera tras esta actividad; teniendo en cuenta que, durante el proceso de extracción, el porcentaje de material útil es significativamente menor al porcentaje de residuos generados (conocidos como relaves), los cuales, generalmente son dispuestos en estructuras similares a una presa [6], pero que, al no ser depositados y tratados de forma adecuada, se convierten fácilmente en pasivos ambientales que generan considerables afectaciones en los ecosistemas de las zonas aledañas. [7]

Para el municipio de Villavicencio, por ejemplo, la mayoría de las extracciones mineras se generan en las redes fluviales, lo cual ha ocasionado alteraciones significativas en el cauce de los ríos y quebradas, afectando la biodiversidad de los cuerpos de agua e incrementando, además, el riesgo por inundaciones y deslizamientos en época de lluvias. [4]

Actualmente, varios países mineros como Perú y Chile, han realizado importantes avances en la utilización y manejo de los pasivos ambientales [8], [9], permitiendo encontrar alternativas que mitiguen las afectaciones generadas en el ambiente por estos residuos. Sin embargo, para Colombia, la información disponible acerca del manejo y uso de los relaves es escasa y dispersa [6]

Esta investigación, teniendo en cuenta la problemática expuesta, plantea una alternativa que mitigue el impacto ambiental ocasionado por la minería, y que al mismo tiempo satisfaga las necesidades del sector de la construcción, mediante el uso de los relaves como material cementante suplementario en la elaboración de unidades de mampostería perforada de concreto. Así mismo, se espera que los resultados de este estudio, sirvan como base en futuras investigaciones sobre el aprovechamiento de estos residuos en la elaboración de otros materiales como losetas, bordillos y adoquines, o sean implementados en proyectos de construcción de viviendas de interés social.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento mecánico de las unidades de mampostería perforada de concreto, elaboradas con reemplazos porcentuales de cemento por relaves provenientes de la extracción minera de agregados.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización fisicoquímica de los relaves producto de los procesos de explotación minera de la planta Zafiro localizada en Villavicencio-Meta.
- Realizar los diseños de la mezcla de concreto patrón y las mezclas de concreto con reemplazo en distintos porcentajes de cemento por relave, utilizadas en la elaboración de las unidades de mampostería.
- Someter a ensayos de resistencia a la compresión y absorción de agua, las unidades de mampostería perforada de cada tipo de mezcla a los 7, 14 y 28 días de curado.
- Analizar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, identificando el tipo de mezcla que mejores características brinde a la unidad de mampostería perforada por cada edad de curado con respecto al diseño de mezcla patrón.
- Realizar un análisis económico entre la mezcla que mejores características mecánicas brinda a la unidad de mampostería (mezcla optima) y la mezcla patrón, determinando de esta forma la viabilidad económica del proyecto.

5. ALCANCE

El presente proyecto de investigación, tiene como objeto el reaprovechamiento del relave minero, como reemplazo porcentual del cemento en la mezcla utilizada para la elaboración de ladrillos perforados o unidades de mampostería de concreto; cumpliendo los estándares de calidad y seguridad exigidos por la normativa técnica colombiana contemplada en el marco normativo del proyecto.

Como principales interesados en el desarrollo de esta investigación, se encuentran diferentes sectores económicos e industriales (fuera del sector minero), como por ejemplo las plantas de tratamiento de aguas residuales, que a la par con entidades e instituciones científicas, adelantan estudios acerca del aprovechamiento de los residuos generados por sus actividades, en el desarrollo de nuevos materiales enfocados a la construcción; todo con el fin de mitigar el impacto ambiental ocasionado.

En concordancia con los intereses expuestos, la investigación a modo de entregable realizará una caracterización fisicoquímica de los relaves en su estado original y los diseños de mezcla de concreto con y sin reemplazo porcentual de cemento, utilizados en la elaboración de las unidades de mampostería que posteriormente serán sometidas a ensayos que determinen la variabilidad de sus características mecánicas a los 7, 14 y 28 días de curado. Así mismo, conforme a los resultados arrojados por los ensayos mecánicos, se determinará la dosificación con la cual las unidades de mampostería presentarán un mejor desempeño; para finalmente, con el fin de determinar su viabilidad económica, presentar el análisis de la relación del costo de producción por unidad y las características mecánicas, entre la unidad de mampostería propuesta y la unidad de mampostería perforada de concreto patrón.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

La minería en Colombia tiene su origen en la época de conquista española, los cuales iniciaron actividades mineras de extracción de plata y oro en el siglo XVI y continuó su explotación por 3 siglos mediante métodos rudimentarios con mano de obra esclava, herramientas de hierro y pólvora negra, hasta finales del siglo XVIII, cuando se inició la tecnificación de las minas en manos de ingenieros alemanes dando inicio a la modernización de minas de socavón y aluvial. Los minerales preciosos fueron los únicos productos explotados hasta principios del siglo XX cuando se comenzó a producir petróleo y posteriormente minerales no metálicos de uso industrial como el azufre, calizas, arcillas, cuarzo, yeso y otros [10].

En la actualidad, una de las minerías con mayor crecimiento económico en el país es la minería de agregados, debido a la gran demanda de este tipo de materiales (principalmente arena, arcilla, grava, caliza y algunas puzolanas) en el sector de construcción, siendo el abastecedor principal de la materia prima para la producción de morteros, concretos, bases, sub-bases, rellenos, asfaltos, entre otros; ocupando un volumen significativo en los mismos, por ejemplo el 65% a 85% del concreto hidráulico, el 92% a 96% del concreto asfáltico y 75% al 90% de los pavimentos [11], [12]

Durante el proceso de explotación de toneladas de piedra para la producción de materiales de construcción, se genera un gran volumen de desechos llamados 'relaves', residuo de mineral que permanece después que este ha sido triturado. Dichos desechos al mezclarse con agua, forman una pasta o lodo que es bombeado a través de tuberías y depositados en estructuras similares a una presa o embalse construidas con los mismos residuos o con otro tipo de material, el cual crece en proporción al ritmo de producción de la mina. Su disposición y tratamiento final es un factor primordial para determinar si un proyecto minero es viable o no ambientalmente, ya que, de no recibir un tratamiento adecuado, puede causar contaminación de cuerpos de agua tanto subterráneos como superficiales y amenaza de la vida silvestre aledaña [13].

Buscando mitigar el impacto generado por estos residuos alrededor del mundo, compañías mineras y profesionales del sector de la construcción le apuestan a la reutilización de los relaves en el proceso de elaboración de materiales constructivos; así lo propone Green Metallurgy Technologies, pionero en el desarrollo de tecnologías que consisten en descontaminar los relaves y emplearlos en la fabricación de ladrillos, sardineles, baldosas, entre otros elementos de albañilería. Igualmente, estudios adelantados por Guillermo Alejandro Lira Cifuentes y Rodrigo Hernán Osses Peña en minas localizadas en Chile, dieron como resultado la factibilidad del aprovechamiento de estos pasivos, utilizando la arena de relave para reemplazar el agregado fino del concreto, obteniendo resistencias mayores a edades tempranas. Alternativas, que según [14] y [15] justifican el aprovechamiento de

estos residuos, ya que no solo dan solución a la problemática ambiental que se enfrenta debido a los pasivos ambientales que representan estos depósitos, sino que además les dan un valor económico agregado [14], [15].

Por otra parte, estos reaprovechamientos se han dado en mayor medida en los bloques de concreto, debido a que los reemplazos porcentuales de agregados o cemento dentro de la mezcla para elaborarlos, no solo han brindado buenos resultados mecánicos y ahorros en el proceso de producción, sino que además, al ser de concreto, no es necesario grandes gastos energéticos para su fabricación frente a otro tipo de mampostería (como en el caso de las unidades de mampostería de arcilla), presenta una disminución de desperdicios de material al momento de realizar acabados ya que se pueden aplicar estucos o pinturas directamente sobre ellos, y ratifican su potencial social y económico al poderse elaborar en lugares apartados o con difícil acceso [16].

Teniendo en cuenta lo anterior, el relave es agregado a la mezcla de concreto, comúnmente como reemplazo porcentual del cemento o del agregado fino. Dicho porcentaje, es calculado de forma experimental, conforme a los resultados arrojados por los ensayos mecánicos hechos a bloques con diferentes porcentajes de reemplazo, y comparando los resultados de estos ensayos con los dados por el diseño inicial de una mezcla patrón, la cual cumpliera con los requerimientos físicos y mecánicos iniciales.

6.2. MARCO CONCEPTUAL

- **Agregados pétreos**

Materiales de roca que debidamente fragmentados y clasificados, se emplean en la industria de la construcción para la parte estructural más comúnmente conocida como “obra negra”; hacen parte de este grupo gravas, arenas, triturados y agregados livianos del concreto [17].

- **Yacimiento mineral**

Es una zona que presenta concentraciones de uno o más y/o minerales de interés económico, que está rodeado de otros minerales o materiales no económicos y no aprovechables. [18].

- **Mina**

Es el lugar en donde se extrae el yacimiento y de donde es posible extraer minerales metálicos o no metálicos con rendimiento económico, ya sea en la superficie o subterránea [17].

- **Explotación Minera**

Actividad ejercida por el hombre con el fin de obtener del componente geográfico e hídrico del planeta todos los recursos de tipo mineral (sal, petróleo, piedras preciosas, metales) para su transformación y comercialización. La explotación minera permite al hombre acorde a su capacidad y ubicación geográfica, ejercerla ya sea de manera artesanal o tecnificada. Ha generado en el sector tecnológico un impacto positivo, promoviendo el diseño y fabricación de equipos sofisticados que reducen el esfuerzo humano y los tiempos de extracción de los recursos [7].

- **Pasivos mineros**

Los pasivos ambientales mineros involucran tanto los socavones o labores mineras, así como los botaderos (escombreras) y los relaves (presas de colas) de minas que dejaron de operar o en abandono, que generan alteraciones en el medio ambiente [15].

- **Impacto Ambiental**

Cualquier alteración sobre el medio ambiente (medios abiótico, biótico y socioeconómico), que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad [19].

- **Relave**

Corresponde al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación. Este residuo, también conocido como cola, es transportado mediante canaletas o cañerías hasta lugares especialmente habilitados o tranques, donde el agua es recuperada o evaporada para quedar dispuesto finalmente como un depósito estratificado de materiales finos (arenas y limos) [20].

- Residuo sólidos o desechos.

Cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final [21]

- Unidad de mampostería

Elemento que, en conjunto, se utiliza para elaborar una mampostería. Puede ser de diversos materiales: piedra, barro, arcilla cocida, concreto, vidrio, etc. Por lo general tiene forma de prisma rectangular [22].

- Unidad de mampostería de concreto.

Unidad de mampostería, de concreto hidráulico, que se emplea para elaborar una mampostería de concreto [22].

- Unidad perforada.

Unidad que tiene perforaciones verticales, longitudinales o transversales cuyo volumen, en conjunto, supera el 25 % del volumen bruto de la unidad [22].

- Bloque de concreto perforado H-12.

Son bloques estructurales cuyas de 19X12X39 cm, elaborados con cemento gris, arena lavada de río y agua [23]. Su resistencia varía entre los 8 Mpa y los 13 Mpa dependiendo si estos son de baja o alta resistencia [22].

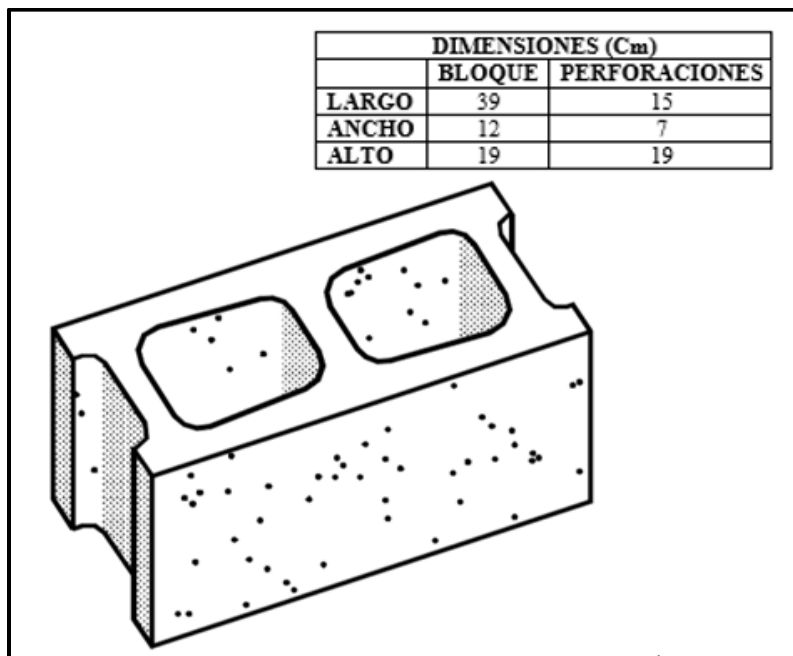


Figura 1. Dimensiones del bloque de concreto H-12.

Fuente: Adaptado y modificado de [22].

- Efecto Filler:

Dado que la resistencia en las pastas de cemento está íntimamente ligada con el grado de hidratación, pequeños reemplazos porcentuales de cemento por cualquier otro material con finura similar, reducirían en gran medida la competencia por el agua de los granos de cemento adyacentes en la mezcla, logrando una mejor hidratación y por ende una aceleración de las reacciones de hidratación; ocasionando un aumento en la resistencia a la compresión (en edades tempranas) en comparación con mezclas con mayor cantidad de cemento, pero menor grado de hidratación. Dicho efecto es conocido como efecto filler. [24]

- Materiales cementantes suplementarios:

Son materiales residuales de cualquier actividad industrial, capaces de formar productos de hidratación similares a los del cemento, permitiendo el reemplazo porcentual del cemento en la mezcla, sin afectar significativamente su desempeño; ya sea reaccionando con el hidróxido de calcio presente en las reacciones de hidratación del cemento, como en el caso de los materiales puzolánicos (cuya composición química es abundante en sílice), o en el caso de los materiales hidráulicos, los cuales son abundantes en óxido de calcio y otros minerales con la habilidad para reaccionar con agua y solidificarse de forma similar al cemento hidráulico. [24]

- Puzolanas

Son materiales naturales o artificiales, silíceos o sílico-aluminosos que por sí mismos poseen poca o ninguna propiedad aglomerante ni actividad hidráulica, pero que, cuando están finamente molidos, en presencia de agua y a temperaturas ordinarias reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (portlandita), formando compuestos con propiedades hidráulicas y aglomerantes similares a las del cemento. [25]

- Resistencia temprana y resistencia tardía en materiales puzolánicos:

En los primeros días de hidratación del cemento, la composición química de los materiales cementantes suplementarios con carácter puzolánico pierde relevancia, atribuyendo toda ganancia de resistencia en este tiempo, principalmente al efecto filler. Por el contrario, en edades tardías la finura del material es irrelevante, y la ganancia de resistencia que obtenga la mezcla será debida a las reacciones entre productos de hidratación del cemento y los compuestos de los materiales puzolánicos, ya que dichas reacciones en estos materiales ricos en sílice, solo tienen lugar pasado una gran cantidad de tiempo (entre los 28 y 90 días); a diferencia de aquellos “*materiales con carácter hidráulico, que mejoran la resistencia en edades tempranas, similar a como ocurre con el cemento*”. [24]

6.3. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, los residuos originados a partir de la explotación de recursos naturales y las actividades industriales, han provocado un aumento en los índices de contaminación al rededor del mundo, ocasionado un afán en el hombre por encontrar soluciones que mitiguen y contrarresten el impacto generado en el ambiente.

En este sentido, las alternativas propuestas en mayor medida, van enfocadas a darle un uso o aplicación a los residuos contaminantes que se acumulan, como sustituto total o parcial de la materia prima utilizada en la fabricación de materiales de construcción.

Sectores como el agroindustrial, por ejemplo, han desarrollado investigaciones acerca de la fabricación de bloques cerámicos perforados, de iguales dimensiones a los bloques convencionales, por medio de un reemplazo en distintos porcentajes de contenido de arcilla, por lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Estos bloques, luego de finalizar sus etapas de elaboración y cocción (a 1200 °C durante 72 horas en un horno Hoffman), se analizaron y compararon frente a un bloque de referencia sin reemplazo (100% arcilla) mediante pruebas de compresión, absorción y flexión. Los resultados arrojados por los ensayos realizados fueron que la dosificación con la que el ladrillo cerámico presentaría mejores características mecánicas es con un reemplazo del 10%, el cual no solo cumple con las normativas técnicas colombianas vigentes, sino que, además, reduciría en un 10% los costos de producción de los bloques convencionales. [26]

En torno al sector minero, también han surgido múltiples investigaciones alrededor del mundo acerca de la utilización de distintos tipos de desechos generados por los procesos de explotación de mineral, en la elaboración de materiales de construcción.

Estudiantes del departamento de ingeniería civil del Sethu Institute of Technology, Kariapatti, Tamil Nadu-India, por ejemplo, evaluaron las propiedades de hormigón verde hecho de polvo de roca de cantera y de mármol como sustitutos del 100% del agregado fino del concreto, con el fin de reducir el consumo de recursos naturales y su huella ambiental. Para ello, se analizaron dos mezclas de concreto: una de ellas con los materiales convencional (cemento, arena y agua), y otra con reemplazos de la arena con el 50% de polvo de roca de cantera y 50% con polvo de mármol. [27]

Dichas mezclas se sometieron a pruebas de slum, slump flow, V- funnel time para verificar su trabajabilidad antes de ser fundido y ensayos de resistencia a la compresión, tensión, absorción de agua y resistencia ante el ataque de sulfatos a edades de curado de 3, 7 y 28 días. Se demostró que la utilización de los desechos mencionados mejora notablemente las propiedades mecánicas del concreto debido a que su composición química se parece a la del cemento (material con carácter

puzolánico), y a su capacidad de micro llenado eficiente que reduce vacíos en el concreto, ya que generalmente se dificulta encontrar arenas bien graduadas en esta zona. Se evidenció superior resistencia a compresión y tensión con valores de 40.35 N/mm² y 5.02 N/mm² respectivamente en comparación con el concreto convencional que presenta resistencias de 36.85 N/mm² y 4.62 N/mm², así como su trabajabilidad favoreciendo su comportamiento autocompactante, además de presenta menor permeabilidad y mayor resistencia ante ataques de sulfatos. [27]

Asimismo, los lodos residuales que generan las actividades mineras conocidos como relaves o jales mineros, también son empleados en los procesos de elaboración de materiales de construcción.

En la región de Sandur, Karnataka - India, se llevó a cabo un estudio para fabricar bloques de tierra comprimida y relaves de la minería de hierro, como alternativa de solución a la acumulación de residuos de una presa que representa riesgo de rompimiento en época de lluvias, localizada en una zona de minería. [28]

Para la fabricación se dosificó el residuo de minería de hierro al 30, 40 y 50%, el cemento se mezcló con limos al 8 y 10% y el porcentaje restante se completó con polvo de mármol. [28]

Según los ensayos de resistencia a la compresión, flexión y absorción de agua realizados a las edades de 7, 15, 30, 60 y 180 días, se comprobó que la resistencia a la compresión aumenta al pasar el tiempo y la que mejor comportamiento presentó cumpliendo con las especificaciones de la norma es la correspondiente a 40% de reemplazo de relaves de minería de hierro, 10% de cemento y limos y 50% de polvo de cantera. Los índices de absorción de agua alrededor de los 30 días son menor al 15% como lo requiere la norma y todas las dosificaciones que se utilizaron presentan valores de resistencia a flexión óptimos para soportar esfuerzos durante la construcción, así como cargas estructurales. [28]

En Sur África, estudiantes de ingeniería química y metalúrgica de University of the Witwatersrand, Johannesburg analizaron la viabilidad de fabricar bloques con relaves de minería de oro provenientes de la cuenca hidrográfica Witwatersrand; dado que, al ser esta una de las principales actividades económicas de la zona, su sobreexplotación genera enormes cantidades de relaves mineros que afectan el medio ambiente. [29]

El análisis se llevó a cabo utilizando el relave como reemplazo total del agregado fino, empleando ocho mezclas con diferentes proporciones de cemento, relaves y agua, una vez fabricados se sometieron a tres diferentes formas de curado: secados al sol, en horno a 360°C y curados en agua por 24 horas. Una vez finalizada esta fase, se dio inicio a los ensayos de resistencia a la compresión, absorción de agua. Los resultados demostraron que en general los bloques presentan mayor resistencia a la compresión cuando se curan en agua ya que favorece la reacción química del cemento; también se encontró que la mezcla que mejor comportamiento obtuvo fue la de dosificación cemento relaves 2:1 con una resistencia de 530 KN/m².

Considerando que el promedio de resistencia a compresión de los bloques convencionales es de 750 Kn/m^2 se determinó que, aunque es posible la fabricación de bloques a partir de los relaves de minería, no mejora su comportamiento estructural y representa mayor costo ya que requiere más contenido de cemento. [29]

En el caso de Perú, una de sus investigaciones acerca del tema, realizada por estudiantes de la Universidad César Vallejo, está relacionada con la mezcla de los relaves de la minería del distrito de Ticapampa, junto con material puzolánico y aserrín para la elaboración de adoquines cerámicos.

La metodología utilizada consistió en realizar una identificación de los parámetros fisicoquímicos de los materiales a utilizar, encontrando altos contenidos de sulfuro de plomo y hierro en los relaves utilizados, por lo que antes de la elaboración de los adoquines cerámicos, fue necesario pasar por una etapa de neutralización de metales pesados, usando cal como material alcalino en un porcentaje del 0.8 para cada tipo de mezcla. Finalizadas las etapas de neutralización y caracterización, se comenzó la etapa de elaboración del adoquín, la cual estuvo dividida en distintas pruebas de concentración del material, dentro de las cuales, además, se desarrolló un proceso de moldeo, prensado y quema del bloque. Se ensayó sus características mecánicas, mediante pruebas de resistencia a la compresión, contenido de humedad y absorción de agua. Una vez terminados y analizados los ensayos, se determinó que la dosificación con la que el adoquín presentaría un mejor comportamiento frente al modelo convencional, fue 0.80% cal, 40% cemento, 5% arcilla, 28.56% aserrín, 0.64% cuarzo granulado y 25% relave. [30]

De igual forma, estudiantes de la Pontificia Universidad Católica del Perú, realizaron como propuesta investigativa la incorporación de 3 muestras de relaves de distintos puntos mineros del país, en mezclas de concreto como relleno volumétrico o como adicionado puzolánico. Sin embargo, los resultados de la caracterización de los materiales descartaron el uso de los relaves como relleno volumétrico debido a su finura (Modulo de Finura de 0.60), lo cual implicaría el uso de mayor cantidad de aditivo (reductor de agua de rango medio "Polyheed 770R") para conseguir una mezcla trabajable. Además, dicho material presentó gran cantidad de sulfatos en su composición, que, aunque se encuentre entre los límites permitidos por la Norma Técnica Peruana, podría ocasionar problemas potenciales de durabilidad en el concreto. [9]

Dicho lo anterior, se dio inicio entonces a la metodología para el uso del relave como adicionado puzolánico con el diseño y preparación de mezclas de concreto, tanto de la mezcla patrón (utilizando el método del A.C.I), como de aquellas con reemplazos del cemento en un orden del 10% y 15% por cada relave; evaluando después la resistencia a compresión a los 3, 7 y 28 días, y la tracción por compresión diametral y abrasión a los 28 días de curado. Posteriormente, gracias a los buenos resultados arrojados en los ensayos mecánicos a edades tempranas por una de las 3 muestras de relaves utilizadas (Andaychagua), se realizaron mezclas con reemplazos de 20% y 25% con este relave, en los mismos tiempos de curado. [9]

Una vez analizados los resultados dados por los ensayos en cada mezcla, se determinó como la mezcla con mejor comportamiento a la GA-ANDAY (10%), que es un diseño con reemplazo del 10% de cemento en peso por el relave Andaychagua. Se concluyó entonces con base en los resultados, que el mejor uso para la mezcla de concreto propuesta era en la construcción de pavimentos con tránsitos liviano o veredas, sin descartarse sin embargo (con un estudio más amplio) su uso en la elaboración de diferentes tipos de prefabricados de baja resistencia. [9]

En Brasil, en el estado de Minas Gerais, se encuentra un lugar llamado cuadrilátero Ferrero por las múltiples compañías que se dedican a la explotación de hierro; las cuales dejan cerca de 700 depósitos de relaves de granulometría fina, representando un pasivo ambiental en la zona de extracción. Lo anterior, llevo a estudiantes de maestría de ingeniería de materiales de construcción del Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais a realizar un estudio de reaprovechamiento de residuos de los depósitos de minería de hierro para la pavimentación de vías y fabricación de adoquines. [31]

Para ellos, se fabricaron adoquines con una mezcla patrón utilizada comercialmente por la industria y tres mezclas sustituyendo el 10, 50 y 80% del agregado fino, y se curaron al aire libre controlando la temperatura con agua. Los ensayos practicados de DRX, FRX, tomografía, resistencia a la compresión, análisis mineralógico y absorción de agua, demuestran que los adoquines que contienen los relaves son aptos para soportar esfuerzos de tráfico pesado, cumpliendo a cabalidad con la resistencia mínima requerida por la norma técnica brasileña (35Mpa) con cerca de 50 Mpa de resistencia y presentando un comportamiento similar a los bloques fabricados con la mezcla patrón. De acuerdo con los ensayos, los bloques presentan además una porosidad menor, lo que se traduce a mayor vida útil del pavimento, se eleva el índice de expansividad y disminuye la absorción de agua. [31]

En el caso de la utilización de los relaves para la pavimentación de vías, mediante análisis de CBR, se comprobó que puede ser implementado en la subbase, sin embargo, no es recomendable implementarla en la base (capa que soporta y distribuye esfuerzos al subsuelo), ya que no cumple con especificaciones CBR. Sin embargo, aunque se demostró que los relaves pueden ser aprovechados en la elaboración de adoquines y en las capas del pavimento, el alto contenido de humedad en los depósitos de donde se extraen los relaves, hace que deba someterse el material a procesos de secado al sol, macerado y tamizado antes de ser usados, lo que representa más esfuerzos y tiempo para las compañías. [31]

Por otra parte, en el caso de la reutilización de los relaves mineros en la elaboración de bloques de concreto, la Universidad Nacional Huancavelica en Perú, en su investigación "*Utilización del relave minero para la elaboración de bloques de concreto tipo ensamblable*" proponían elaborar bloques de concreto con una resistencia diseño de 14.71 Mpa, reutilizando los relaves de la minería con reemplazos del 25%, 50%, 75% y 100% del agregado fino. Para ello, en la primera fase se sometieron a ensayos de resistencia a la compresión y absorción de agua

a los 28 días de curado, 7 probetas cilíndricas por cada tipo de mezcla. De acuerdo a los resultados arrojados por los ensayos mencionados, se observó que el diseño de mezcla que presentó mayor resistencia a la compresión (14.15 Mpa) fue aquella con un 50% de reemplazo. Dicha mezcla sería la utilizada entonces en la elaboración de los bloques ensamblables, los cuales pasados los 28 días de curado nuevamente fueron sometidos a ensayos de resistencia y absorción, dando como resultado una resistencia de 7.79 Mpa y una absorción del 11.54%. [32]

La investigación concluyó conforme al análisis de los resultados brindados, que la utilización del relave minero como sustituto del agregado fino en la mezcla de concreto es una solución viable, ya que presenta características mecánicas que se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa técnica peruana, además de generar un ahorro frente a los materiales convencionales del 7.85% en los costes de construcción por metro cuadrado de muro. Los autores también sugieren adelantar investigaciones que incorporen el diseño de mezcla propuesto en la elaboración de adoquines, veredas de hormigón y pavimentos de bajo tránsito. [32]

Del mismo modo, nuevamente en India, país que posee grandes reservas de hierro y es uno de los principales productores a nivel mundial, explotando más de 2500 millones de toneladas anuales; se realizó una investigación por parte de estudiantes de ingeniería de minas del Indian Institute of Technology de Kharagpur, planteando de forma experimental el uso de IOW (desechos de mineral de hierro) en la elaboración de bloques como sustituto de la arena y el cemento, en orden de ahorrar recursos y generar un desarrollo sostenible. [33]

En el desarrollo de la investigación, sometieron 4 mezclas de concreto con diferentes porcentajes de IOW, cemento y arena a ensayos de resistencia a la compresión y absorción de agua a los 7, 14, 21 y 28 días de curado. Como resultado, se concluyó entonces que la mezcla hecha de cemento, arena y IOW, con dosificación 30:30:40 a los 28 días de curado presenta una resistencia a la compresión de 42.95 MPa y absorción de agua del 2.42 %, cumpliendo con los estándares y especificaciones de la Bureau of Indian Standards IS-2180:1988 (resistencia mínima a la compresión de 40 Mpa y un porcentaje de absorción de agua menor al 10%) para bloques de servicio pesado, utilizados en puentes y cimentaciones, y representando además un alto ahorro energético al no requerir cocción durante su proceso de elaboración. [33]

6.4. MARCO NORMATIVO

Tabla 1. Marco Normativo del proyecto.

	TÍTULO	DESCRIPCIÓN
NSR-10 TÍTULO D (2010)	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. TÍTULO D: Mampostería estructural	Esta norma establece los requisitos mínimos de diseño y construcciones para las estructuras de mampostería y sus elementos; con un nivel de seguridad que se compara a las estructuras de otros materiales, diseñados y construidos con los requisitos de este reglamento. [34]
NTC 454 (1996)	Ingeniería civil y arquitectura. Determinación de la contracción lineal por secado en unidades-bloques y ladrillos- de concreto, para mampostería.	Establece el procedimiento para determinar la contracción lineal por secado de unidades de mampostería y otros productos de concreto, bajo condiciones específicas de secado acelerado. NOTA: Esta norma es equivalente a la norma ASTM C172: 2010. [35]
NTC 4026 (1997)	Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural.	En esta norma se establece aquellos requisitos para unidades de mampostería (maciza o perforada) de concreto, elaboradas con cemento Pórtland, agua y agregados minerales con la inclusión o no de otros materiales, aptos para elaborar mampostería estructural (y no estructural, con el cumplimiento de los requisitos expuestos por la presente norma) [36]
NTC 4383 (1999)	Ingeniería civil y arquitectura. Mampostería de concreto. Términos y definiciones.	Se establece la terminología y las definiciones utilizadas para la mampostería de concreto. [22]

<p>NTC 4024 (2001)</p>	<p>Prefabricados de concreto. Muestreo y ensayo de prefabricados de concreto no reforzado, vibro compactados.</p>	<p>Se establece los procedimientos para el muestreo y el ensayo de prefabricados de concreto no reforzado, elaborados con mezclas “secas”, vibro compactados, con el fin de evaluar su resistencia a la compresión, absorción, densidad, contenido de humedad y dimensiones.</p> <p>NOTA: Esta norma es equivalente a la norma ASTM C140/99 con desviaciones técnicas menores. [37]</p>
<p>NTC 4076 (2017)</p>	<p>Unidades de concreto para mampostería no estructural.</p>	<p>Esta norma establece los requisitos para unidades de mampostería, perforadas o macizas, elaboradas con cemento hidráulico, agua, agregados minerales con la inclusión o no de otros materiales.</p> <p>NOTA: Esta norma es una adopción modificada (MOD) de la norma ASTM C129: 2014a. [38]</p>
<p>NTC 550 (2017)</p>	<p>Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el sitio de trabajo.</p>	<p>Esta norma establece los procedimientos para la elaboración y curado de especímenes cilíndricos y prismáticos, tomados de muestras representativas de concreto fresco para construcción.</p> <p>NOTA: Esta norma es una adopción modificada (MOD) de la norma ASTM C31: 2015. [39]</p>
<p>NTC 396 (2018)</p>	<p>Concretos. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.</p>	<p>Esta norma establece el método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto hidráulico en la obra y en el laboratorio.</p> <p>NOTA: Esta norma es una adopción modificada (MOD) de la norma ASTM C143: 2015a [40]</p>
<p>NTC 174 (2018)</p>	<p>Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto.</p>	<p>Esta norma establece los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos (excepto los agregados livianos y pesados) para uso en concreto.</p> <p>NOTA: Esta norma es una adopción modificada de la norma ASTM C33: 2016. [41]</p>

Fuente: Autores.

6.5. MARCO GEOGRÁFICO

La ciudad de Villavicencio, capital del departamento del Meta, está ubicada en la región de la Orinoquia colombiana a 467 msnm en el piedemonte de la Cordillera Oriental, al noroccidente del departamento; limitando al norte con los municipios de Restrepo y el Calvario, al este con el municipio de Puerto López, al oeste con el Departamento de Cundinamarca y al sur con el municipio de Acacias y San Carlos de Guaroa. [42]

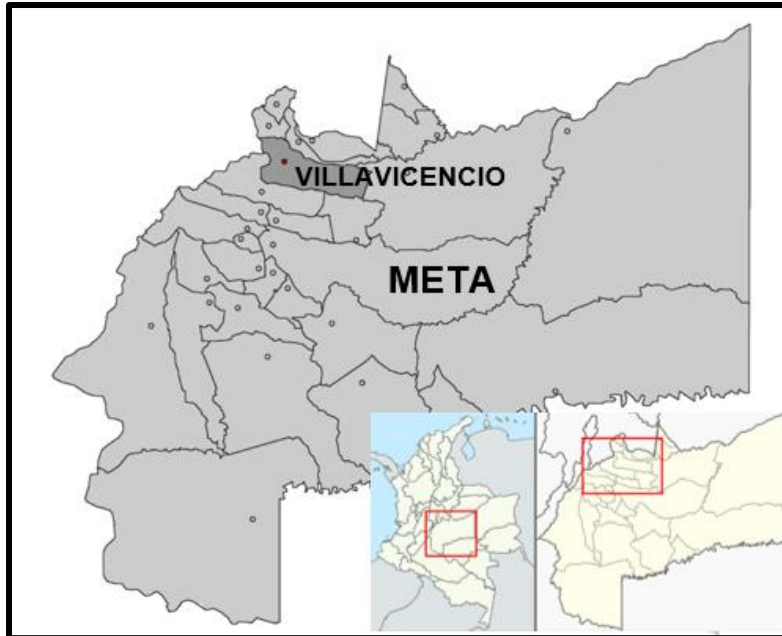


Figura 2. Ubicación geográfica del municipio de Villavicencio en el Departamento del Meta. Fuente: [43].

Para la presente investigación se tomarán los relaves, materia prima de los bloques perforados, de la Mina Zafiro especializada en la extracción y producción de materiales de construcción, con título minero en el río Guayuriba; se encuentra ubicada en el municipio de Villavicencio, en el km 18 de la vereda El Cocuy.



Figura 3. Ubicación relavera Mina Zafiro en el municipio de Villavicencio.
Fuente: Adaptado y modificado de [44]

7. METODOLOGÍA

La fase experimental de este proyecto fue dividida en 4 etapas, las cuales abarcan desde la caracterización físico-química de los materiales, hasta el correspondiente análisis mecánico y económico de los resultados de los ensayos realizados (ver figura 4); describiéndose de forma detalla cada una de estas etapas a continuación.

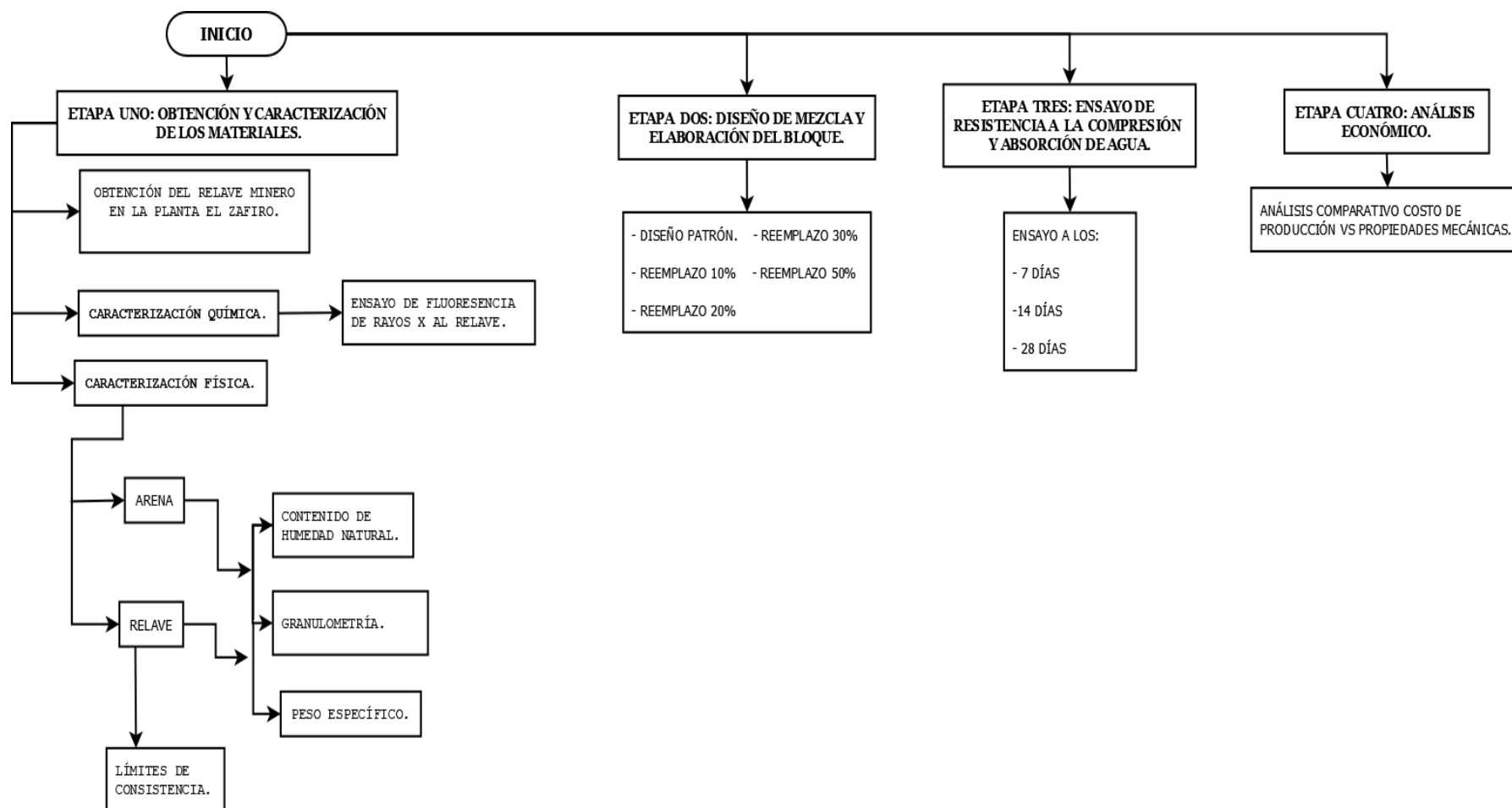


Figura 4. Esquema de la metodología empleada. Fuente:Autores.

7.1. ETAPA 1: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

7.1.1 Obtención del material.

El relave minero utilizado en esta investigación se obtuvo de la relavera de la planta el Zafiro, ubicada en el Km 18 de la vereda El cocuy en Villavicencio-Meta, Colombia; dedicada a la extracción y trituración de materiales de arrastre en el río Guayuriba, para la producción de gravas, arenas, bases y sub-bases, entre otros materiales de construcción.

El material de crudo, se extrae del título minero ubicado en la playa del río Guayuriba y se traslada a la planta, donde es sometido a diferentes procesos de trituración y clasificación dependiendo del material que se esté produciendo. En el caso de las arenas y gravas, se requiere realizar un lavado con chorro de agua a presión del material mientras este es separado por cribas, con el fin de eliminar la mayor cantidad de lodos, arcillas, material orgánico o cualquier otra sustancia que pueda afectar la adherencia del concreto y por lo tanto su resistencia. El agua con el material residuo resultante de este proceso es bombeado a unas piscinas o depósitos conocidos como relaveras; lugar de donde es extraído finalmente el relave a evaluar en esta investigación. Actualmente dicha relavera contiene alrededor de 2000 metros cúbicos de relaves.

Por otra parte, y teniendo en cuenta las especificaciones de los materiales utilizados para la elaboración de los bloques de concreto H-12 convencionales, se utilizaron para este proyecto cemento portland Tipo I, y arena lavada de río (extraída también del río Guayuriba).

7.1.2 Caracterización química.

La fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras (entre los que se encuentran sólidos, líquidos, lodos y polvos sueltos), por medio de un análisis semicuantitativo no destructivo. [45].

Para el caso de esta investigación, dicho ensayo fue realizado por la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá a una muestra de relave de aproximadamente 30g, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra.

Los resultados del ensayo, cómo se evidencia en el anexo A, revelaron que el relave presenta una alta composición de silicio y aluminio, representando cerca del 79% de la composición química total de la muestra.

7.1.3 Caracterización física.

- Granulometría.

Con el fin de determinar el tamaño y distribución de partículas tanto de la arena como del relave a utilizar, se realizó un análisis granulométrico de cada material de acuerdo con la norma INVIAS-E-123-13.

Para el caso de la arena, la granulometría se realizó a una muestra de aproximadamente 500 gr utilizando el método de tamizado; reteniendo en mayor porcentaje el material entre el tamiz #10 (arena gruesa) y el tamiz #40 (arena media), como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis granulométrico por tamizado de la arena.

	Tamiz	Abertura (mm)	Retenido		% Q' Pasa
			(gr)	(%)	
Arena gruesa.	# 10	2.00	135.65	27.13	72.87
Arena media.	# 20	0.850	86.35	17.27	55.60
	# 40	0.425	89.00	17.80	37.80
Arena fina.	# 60	0.250	79.85	15.97	21.83
	# 140	0.106	85.00	17.00	4.83
	# 200	0.075	14.90	2.98	1.85
	Base		8.35	1.67	
	Total retenido		499.10	99.82	

Fuente: Autores.

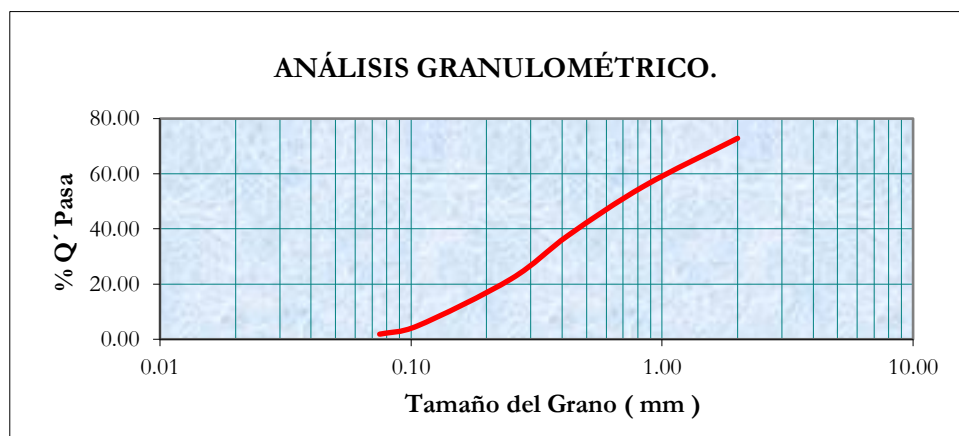


Figura 5. Curva granulométrica de la arena.

Fuente: Autores.



Figura 6. Tamizadora digital, utilizada en el ensayo de granulometría. Fuente: Autores.



Figura 7. Juego de tamices después de realizado el ensayo de granulometría de la arena. Fuente: Autores.

Por otra parte, de acuerdo con la normativa utilizada y debido a la distribución del tamaño de sus partículas (menores a $75 \mu\text{m}$), se determinó la granulometría del relave por medio del método del hidrómetro.

Como resultado, se concluyó una vez finalizado el ensayo, que las partículas de la muestra presentaban en mayor media un diámetro de $50 \mu\text{m}$, como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis granulométrico por hidrómetro del relave.

Tiempo (min)	Lectura de hidrómetro (R)	% que pasa	Diámetro de las partículas D (mm)
1	27	48.274	0.0501
2	26	46.079	0.0355
5	23	39.497	0.0229
15	21	35.108	0.0135
30	18	28.525	0.0097
60	15	21.943	0.0070
120	13	17.554	0.0050
250	11	13.166	0.0035
1440	8	6.583	0.0015

Fuente: Autores.

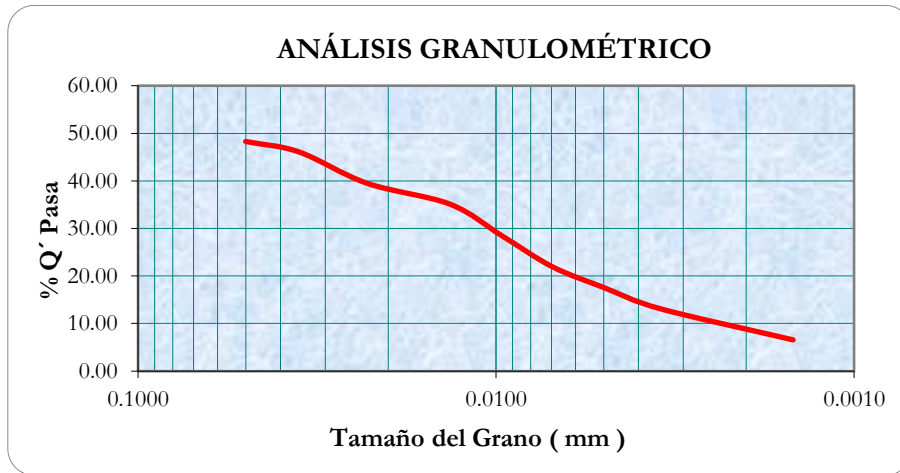


Figura 8. Curva granulométrica del relave.
Fuente: Autores.



Figura 10. Lectura del hidrómetro + defloculante.
Fuente: Autores.

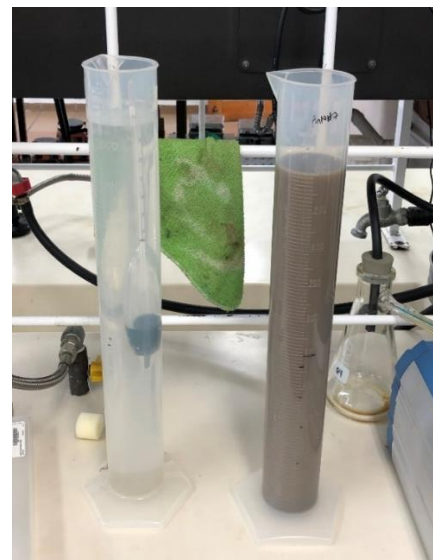


Figura 9. Limpieza del hidrómetro en agua destilada antes de la siguiente lectura.
Fuente: Autores.



Figura 11.
Primera lectura del hidrómetro.
Fuente: Autores.

○ *Contenido de humedad (natural).*

Para determinar el contenido de agua o humedad natural tanto del relave como de la arena, se realizó el ensayo de contenido de humedad de los suelos de acuerdo con la norma INVIAS-E-122-13; arrojando como resultado, una vez finalizado el ensayo, un 17.93% de contenido de humedad para el caso del relave y un 0.77% para el caso de la arena, tal y como se evidencia en la tabla 4.

Tabla 4. Contenido de humedad del relave y la arena.

	RELAVE (LODO)			ARENA		
	1	2	3	1	2	3
Contenido de humedad %	17.51	17.37	18.92	0.81	0.70	0.81
Promedio	17.93			0.77		

Fuente: Autores.



Figura 12. Muestras de arena y relave secadas en el horno durante el ensayo de contenido de humedad de los suelos.

Fuente: Autores.

○ *Peso específico de los sólidos.*

El peso específico de los sólidos para esta investigación, fue determinado por el laboratorio INGEGAR INGENIERÍA S.A.S de la ciudad de Villavicencio-Meta, bajo la norma INVIAS-128-13 para el caso del relave, y la norma INVIAS-E-222-13 para el caso de la arena. Los resultados obtenidos al finalizar los ensayos de cada material, se pueden evidenciar en la tabla 5.

Tabla 5. Peso específico del relave y la arena.

	RELAVE	ARENA
Peso Específico (gr/cm³)	2.46	2.72

Fuente: Autores.

Nota: Para ampliar la información del ensayo ver Anexo B.4.

○ Límites de consistencia.

Los ensayos de límites de consistencia, se realizaron a una muestra de relave de aproximadamente 200 gr de acuerdo con las normas INVIAS-E-125-13 e INVIAS-E-126-13; los cuales dieron como resultado un límite líquido de 26.32%, un límite plástico de 17.98% y un índice de plasticidad igual al 8.35%, como se observa en la tabla 6.

Tabla 6. Límites de consistencia del relave.

LÍMITES DE CONSISTENCIA.		
Límite Líquido	L.L	26.32%
Límite Plástico	L.P	17.98%
Índice de Plasticidad	I.P	8.35%
Grado de consistencia	Kw	1.01
Grado de consistencia	Media dura, solida.	

Fuente: Autores.



Figura 13 y Figura 14. Ensayo de limite liquido en la cazuela de Casagrande.
Fuente: Autores.

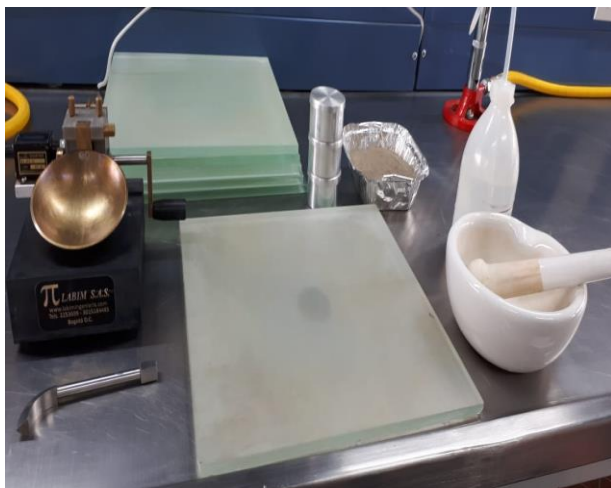


Figura 15. Equipos necesarios para realizar el ensayo de límites de consistencia. Fuente: Autores.



Figura 16. Ensayo de limite plástico. Fuente Autores.

7.2. ETAPA 2: DISEÑO DE MEZCLA Y ELABORACIÓN DEL BLOQUE.

7.2.1 Diseño de mezclas de concreto.

En esta etapa, se realizó el diseño de mezcla patrón tomando como referencia la dosificación (1:5) y relación agua cemento (w/c:0.5) utilizada comercialmente por empresas de prefabricados regionales, y 4 diseños con reemplazos porcentuales de 10%,20%,30% y 50% de cemento por relave en la mezcla, tal y como se presenta en la tabla 7.

Cabe mencionar, que las cantidades de materiales (arena y cemento) en la mezcla patrón fueron ajustadas de acuerdo a sus volúmenes absolutos. Los cálculos realizados tanto para este diseño como para los diseños con reemplazo porcentual, se podrán ver en el anexo C.

Tabla 7. Cantidad de materiales requeridos por cada diseño de mezcla.

Diseño de mezcla	Patrón.	Reemplazo 10% (R10)	Reemplazo 20% (R20)	Reemplazo 30% (R30)	*Reemplazo 50% (R50)
**Material.					
Cemento (Kg)	11.61	10.45	9.29	8.12	3.87
Arena (Kg)	58.03	58.03	58.03	58.03	38.69
***Agua (Kg)	5.80	5.22	4.64	4.06	3.87
w/c	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Relave (Kg)		1.16	2.32	3.48	3.87
NOTAS:					
*Las cantidades de cada material están dadas para la elaboración de 6 bloques de concreto H-12 (Ver Figura 1) por cada diseño de mezcla, a excepción del diseño R50, cuyos cálculos fueron ajustados para elaborar solo 4 bloques H-12.					
** Las cantidades dadas de cada material, ya contemplan dentro de los cálculos para cada diseño un 5% de desperdicio.					
*** Se realizó por cada diseño de mezcla un ajuste de la cantidad de agua, con el fin de mantener en todos los casos una relación agua/cemento (w/c) de 0,5.					

Fuente: Autores.

Finalmente, una vez concluido el diseño de las mezclas, se dio inicio a la fase de elaboración de los bloques, utilizando una maquina vibrocompactadora durante el proceso, tal y como se observa en las figuras 17,18 y 19.

Una vez elaborados todos los bloques y finalizado el proceso de fraguado, se sumergen los especímenes en un tanque de curado, hasta el día en que serán sometidos al ensayo de compresión y absorción de agua.



Figura 17, Figura 18 y Figura 19. Máquina vibrocompactadora para elaborar bloques. Fuente: Autores.



Figura 20. Relave después de pasar por el proceso de secado y zarandeo. Fuente: Autores.



Figura 21. Bloques H-12 con y sin reemplazo porcentual de cemento durante el proceso de fraguado. Fuente: Autores.

7.3. ETAPA 3: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y ABSORCIÓN DE AGUA.

Los ensayos de resistencia a la compresión y absorción de agua para cada diseño, fueron realizados por el laboratorio de suelos, concretos y pavimentos NHSQ INGENIERÍA S.A.S de la ciudad de Villavicencio, bajo la normativa NTC-4024 Y NTC 4026 a los 7,14 y 28 días de curado. Los bloques correspondientes a la mezcla R50, solo se sometieron a ensayos a los 14 y 28 días.

Para el caso de esta investigación, la resistencia de los bloques se evaluará de acuerdo a los límites y requisitos para bloques de concreto de uso estructural de resistencia baja dados por la normativa NTC-4026.

El informe de los resultados de los ensayos dados por el laboratorio, pueden verse en los anexos E, F y G.



Figura 22. Esquema del ensayo de la resistencia a la compresión para bloques de concreto. Fuente: Autores.



Figura 23 y Figura 24. Bloque patrón y bloque R50 después de realizado el ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Autores.

7.4. ETAPA 4: ANÁLISIS ECONOMICO DEL PROYECTO.

Inicialmente, se planteó una comparación de producción por unidad de mampostería entre la mezcla patrón y aquella mezcla que hubiera presentado el mejor desempeño mecánico de acuerdo a los ensayos realizados, con el fin de determinar su viabilidad económica. Sin embargo, dado el buen desempeño que presentaron los bloques con reemplazos a lo largo de los ensayos, se decidió realizar dicha comparación con cada uno de los diseños de mezcla, determinando además de su viabilidad económica, el porcentaje de ahorro que representaría cada reemplazo frente al coste total de producción por unidad de mampostería.

Por otra parte, los precios dados dentro de este análisis para la arena y el cemento son producto de cotizaciones realizadas a distintos comercios de la ciudad, con el fin de tener un estimativo real del coste de producción de cada unidad de mampostería. En el caso del relave, se contempló únicamente el precio de transporte por metro cubico desde la planta El Zafiro hasta el perímetro urbano de Villavicencio, dado que al ser este un material de residuo, no representaba ningún valor comercial.

Los resultados dados por el análisis, así como los soportes de las cotizaciones realizadas pueden verse en los anexos H y I respectivamente.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA.**

El relave utilizado es un material de residuo, fino y de baja plasticidad, producto del proceso de triturado, cribado y clasificación del material de arrastre extraído del río Guayuriba por la planta de trituración El Zafiro; con un tamaño de partícula similar al de los suelos limo arcillosos, de acuerdo con la clasificación granulométrica dada por la norma INVIAS-123-13 y los resultados dados por los ensayos de límites de consistencia (ver tablas 3 y 6).

Por otra parte, su composición química, alta en óxidos de sílice, aluminio y hierro (ver anexo A), lo convierte en un material puzolánico, con capacidad para formar (en presencia de humedad) compuestos que poseen propiedades cementantes, de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC-385.

- **DISEÑO DE MEZCLA.**

Dado que el objetivo de la investigación es analizar la incidencia del relave en la resistencia de las mezclas de concreto, se determinó realizar un ajuste en la cantidad de agua de cada mezcla, con el fin de que la relación agua cemento sea igual en todos los casos, y no sea este un factor influyente en la diferencia de comportamiento mecánico presente entre los diseños de mezcla.

- **ENSAYOS REALIZADOS A LOS 7 DÍAS DE CURADO.**

En los ensayos de resistencia y absorción de agua a los 7 días de curado, las mezclas con reemplazo mostraron un buen comportamiento mecánico frente a la mezcla referencia o patrón.

Para el caso del ensayo de resistencia (figura 25), la mezcla R10 alcanzó cerca del 90% de la resistencia de la mezcla patrón, presentando el mejor comportamiento de las 3 mezclas con reemplazo; seguida de la mezcla R30 y R20 con un porcentaje del 83% y 66% respectivamente.

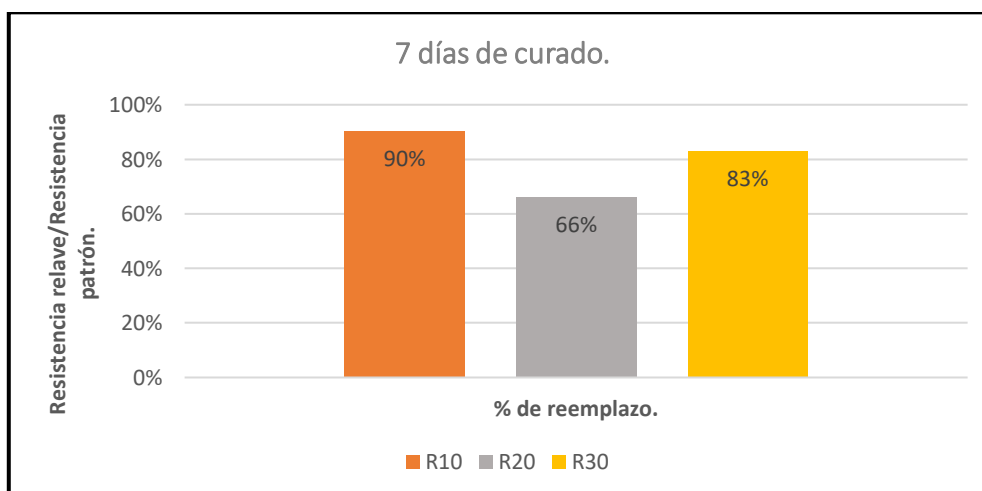


Figura 25. Resistencia a la compresión de las mezclas con reemplazo en relación con la resistencia de la mezcla patrón a los 7 días de curado.

Fuente: Autores.

Por otra parte, los resultados dados por el ensayo de absorción de agua se presentaron con ligeras variaciones (menores al 5%) entre las mezclas con reemplazo y la mezcla patrón.

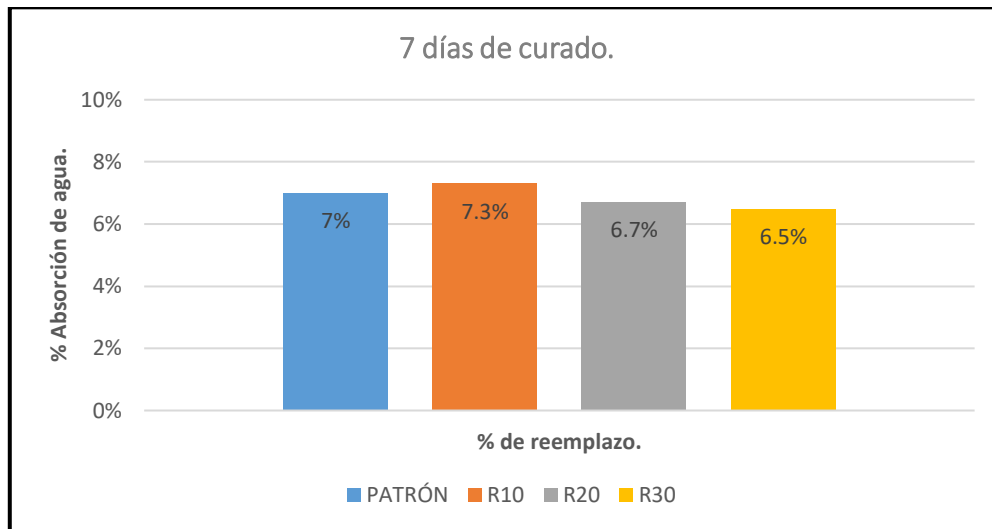


Figura 26. Absorción de agua de los bloques a los 7 días de curado.
Fuente: Autores.

- **ENSAYOS REALIZADOS A LOS 14 DÍAS DE CURADO.**

Dado el buen desempeño presentado por las mezclas con reemplazo frente al diseño patrón en edades tempranas, se decidió realizar un nuevo diseño de mezcla con un reemplazo del 50% del cemento por relave, evaluando su resistencia a la compresión y porcentaje de absorción de agua por medio de ensayos mecánicos a los 14 y 28 días de curado, con el fin de tener un referente de su comportamiento mecánico tanto en edad temprana como tardía.

Dicho lo anterior, a los 14 días de curado los bloques con reemplazo presentaron nuevamente un buen desempeño mecánico frente a la mezcla referencia, siguiendo con pequeñas variaciones la tendencia dada a los 7 días de curado.

En cuanto al ensayo de resistencia a la compresión (figura 27), se destacó el desempeño de la mezcla R20, alcanzando un 102% de la resistencia de la mezcla patrón; seguida de la mezcla R10, R20 y R50 con un porcentaje del 98%, 92% y 84% respectivamente.

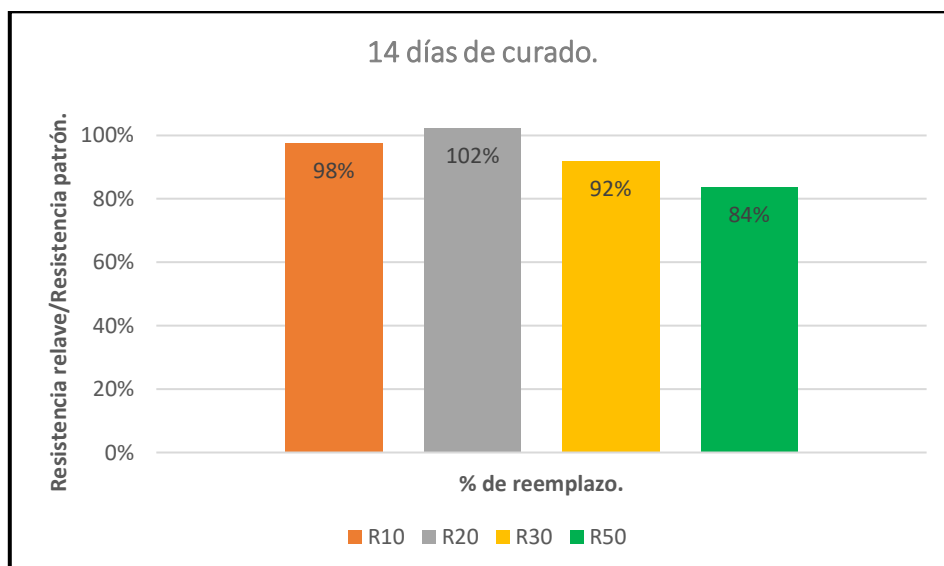


Figura 27. Resistencia a la compresión de las mezclas con reemplazo en relación con la resistencia de la mezcla patrón a los 14 días de curado.
Fuente: Autores.

En el caso del ensayo de absorción de agua, los resultados presentaron nuevamente un rango de diferencia menor al 5% entre los porcentajes de absorción de las mezclas con reemplazo y la mezcla patrón; sufriendo un ligero aumento (en todos los casos) del porcentaje de absorción, en comparación con los resultados arrojados a los 7 días.

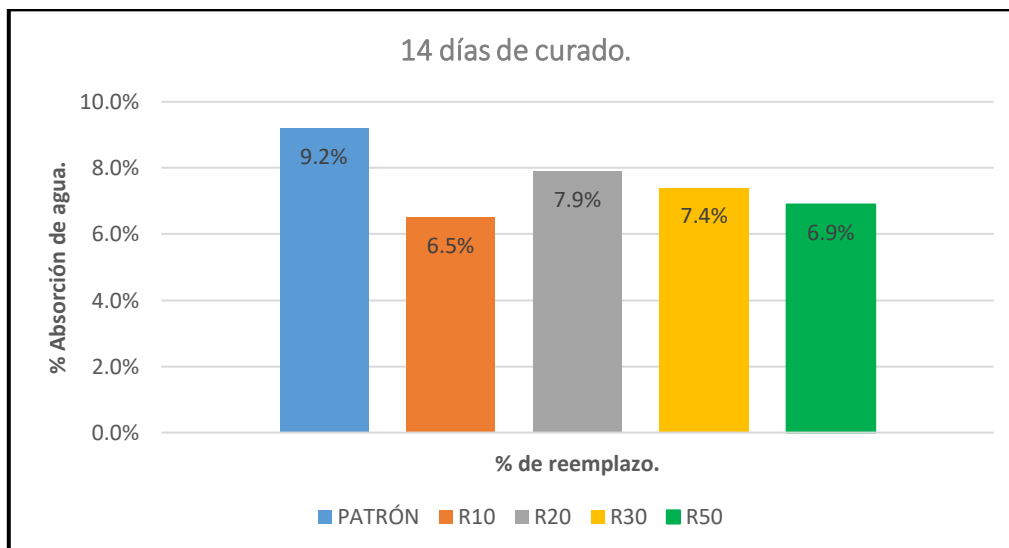


Figura 28. Absorción de agua de los bloques a los 14 días de curado.
Fuente: Autores.

- **ENSAYOS REALIZADOS A LOS 28 DÍAS DE CURADO.**

A los 28 días de curado, las mezclas con reemplazos tuvieron un muy buen desempeño mecánico, incluso en grandes reemplazos como es el caso de la mezcla R50, manteniendo la tendencia dada por los resultados de los ensayos a los 14 días.

En el caso de la resistencia a la compresión (figura 29), nuevamente el diseño que mejor desempeño presento en relación con la mezcla patrón fue la mezcla R20, alcanzando el 98% de su resistencia; seguida de la mezcla R10, R30, R50 con un porcentaje del 96%, 94% y 84% respectivamente.

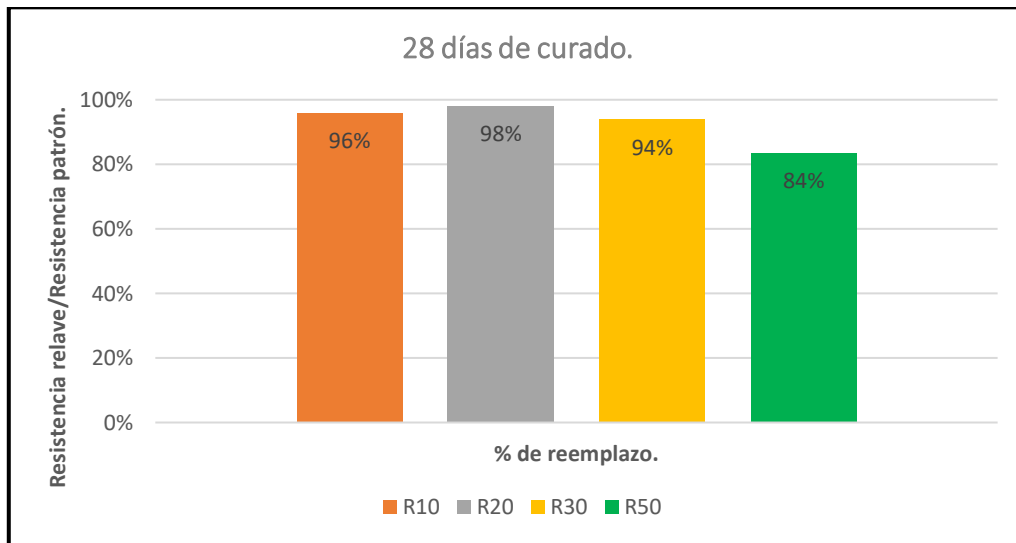


Figura 29. Resistencia a la compresión de las mezclas con reemplazo en relación con la resistencia de la mezcla patrón a los 28 días de curado.

Fuente: Autores.

En el ensayo de absorción de agua, los resultados presentaron nuevamente un rango de diferencia menor al 5% entre los porcentajes de absorción de las mezclas con reemplazo y la mezcla patrón; sufriendo un ligero aumento (en todos los casos) del porcentaje de absorción, en comparación con los resultados arrojados a los 7 y 14 días.

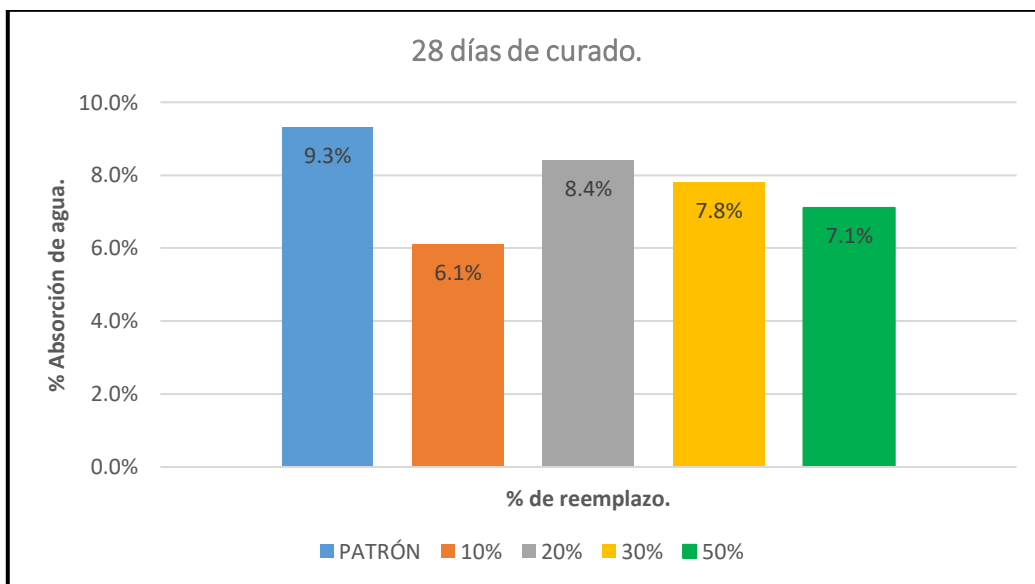


Figura 30. Absorción de agua de los bloques a los 28 días de curado.

Fuente: Autores.

En términos generales, de acuerdo a los resultados dados por el ensayo de absorción de agua en las 3 edades de curado, se puede inferir que el uso del relave como reemplazo porcentual del cemento en mezclas de concreto, no afecta de forma negativa el porcentaje de absorción de los bloques, aun en altos porcentajes de reemplazo, como es el caso de las mezclas R30 y R50.

En cuanto a la relación reemplazo – resistencia, de acuerdo a [24] se considera que la pérdida de resistencia de las mezclas con reemplazo frente al diseño patrón debe ser proporcional a la cantidad de reemplazo de cemento, es decir por ejemplo que para una mezcla con un 90% de cemento se presente un 10% menos de resistencia. Sin embargo, los desempeños en relación con el diseño patrón en todos los niveles de reemplazo en las 3 edades de curado, tuvieron un porcentaje de pérdida de resistencia menor a sus porcentajes de reemplazo, lo cual indica impactos positivos del uso porcentual del relave en las mezclas de concreto desde la perspectiva de la resistencia mecánica.

Lo anterior puede atribuirse a la finura (bajo tamaño diametral) del relave, lo que proporciona una mezcla más uniforme, homogénea y sin porosidad considerable, esto por su capacidad de acomodación de las partículas, lo que en términos de resistencia es favorable.

Por otra parte, se señala que la variación en la resistencia de la mezcla R20 frente a la tendencia dada por las demás mezclas con reemplazo, es atribuido principalmente a errores humanos cometidos durante el proceso de elaboración del bloque.

- *ANÁLISIS ECONOMICO DEL PROYECTO.*

El análisis del proyecto arrojó resultados favorables en todos los porcentajes de reemplazo (figura 31) con ahorros significativos de hasta el 41% en el costo total de producción por unidad de mampostería, como es el caso de la mezcla R50; teniendo en cuenta además, que los resultados dados durante los ensayos mecánicos en todos los casos de reemplazo, estaban siempre dentro de los límites y rangos permitidos para este tipo de bloques de acuerdo con la norma NTC 4026. Lo anterior, convierte al proyecto entonces en una alternativa comercial altamente competitiva.

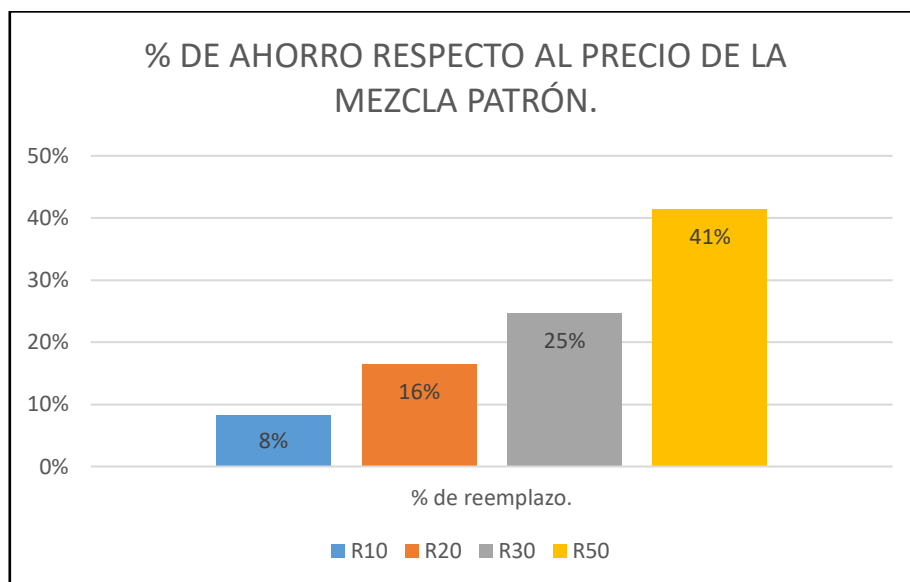


Figura 31. Porcentaje de ahorro de las mezclas con reemplazo respecto al coste total de producción de la mezcla patrón por unidad de mampostería.
Fuente: Autores.

9. RESULTADOS E IMPACTOS

Los resultados de esta investigación, producto de la ejecución de la metodología planteada y teniendo como enfoque cada uno de los objetivos específicos del proyecto, se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Resultados de la investigación.

RESULTADO	INDICADOR	OBJETIVO RELACIONADO
Caracterización de los relaves.	Ensayos fisicoquímicos de laboratorio.	Objetivo específico 1.
Mezclas de concreto con y sin reemplazo (patrón).	Diseño de mezcla de concreto.	Objetivo específico 2.
Resistencia a la compresión y absorción de agua.	Ensayo de compresión y porcentaje de absorción de agua.	Objetivo específico 3 y 4.
Identificación de la dosificación óptima.	Análisis de los resultados de resistencia a la compresión y absorción de agua.	Objetivo específico 4.
Viabilidad económica de la unidad de mampostería perforada propuesta.	Análisis económico entre la dosificación óptima y la mezcla patrón.	Objetivo específico 5.

Fuente: Autores.

9.1. IMPACTOS

Cumplidos los objetivos de esta investigación, se espera una serie de posibles impactos que abarquen aspectos técnicos, en cuanto a su innovación y aporte a la ingeniería de la construcción; además de su contribución con el desarrollo sustentable de la sociedad, lo que ha sido punto de enfoque desde la concepción del proyecto.

Con base en lo anterior, se relaciona en la siguiente tabla, cada uno de los impactos y supuestos esperados, con los sectores que estos podrían afectar, de acuerdo a una estimación general del tiempo en que se podrán presentar.

Tabla 9. Descripción de los impactos esperados con el desarrollo del proyecto.

Aspecto/ Sector	Impacto	Supuesto	Plazo
Técnico	La demostración de la eficiencia de la técnica de elaboración de unidades de mampostería con materiales alternativos, mediante la metodología planteada.	Proveerá a la ingeniería civil de un elemento constructivo competente ante las demandas que implica su función. De acuerdo a la normativa establecida, siendo óptimo en cuanto a seguridad y uso.	Corto
Académico	La elaboración y publicación del documento técnico con sus respectivas especificaciones, dados los resultados obtenidos.	Potenciará el trabajo de investigadores y académicos en general, dedicados a la investigación de nuevos materiales de construcción, sirviendo como insumo a sus futuros trabajos.	Mediano
Ambiental	La implementación de este material de construcción, como alternativa de reemplazo de los materiales convencionales y contaminantes.	Reducirá la contaminación proveniente del proceso de fabricación de los bloques de mampostería convencionales, y la contaminación que provocan las plantas de minería de agregados, con sus residuos.	Largo
Social	La asequibilidad y la facilidad de aplicación, que brinda el material desarrollado.	Mejorará la calidad de vida de personas pertenecientes a zonas vulnerables, permitiéndoles acceder a un producto sustentable para su uso en la elaboración o mejora de sus viviendas.	Largo
Económico	El análisis sobre el costo para la elaboración del producto.	Dejará a disposición del mercado, un producto que, por su costo y su utilidad de aplicación, potenciará el sector de la construcción y beneficiará a los empresarios interesados en adquirirlo y comercializarlo.	Largo
Industrial	El desarrollo comprobado de la técnica para la producción de unidades de mampostería con materiales alternativos.	Brindará a la industria de materiales de construcción, una nueva técnica para la elaboración de unidades de mampostería perforada.	Corto

Fuente: Autores.

10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

10.1. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de los ensayos mecánicos realizados (anexo D), la mezcla R20 fue aquella con la que se alcanzó el mejor desempeño tanto en edades tempranas como tardías en relación con la mezcla patrón, alcanzando el 98% de su resistencia a los 28 días de curado, como se evidencia en la figura 29. Sin embargo y teniendo en cuenta el análisis económico realizado, se concluye que la mezcla óptima de esta investigación es la mezcla R50, dado que no solo cumple con los requisitos mecánicos dados por la norma NTC 4026, sino que además (como se observa en la figura 31) genera un ahorro de hasta el 41% en el coste total de producción por unidad de mampostería. Dato significativo que convierte a la propuesta de este proyecto, en una alternativa altamente viable comercialmente.

Aunado a lo anterior, y teniendo en consideración que la industria cementera genera alrededor del 5% de las emisiones de CO₂ generadas por el hombre a nivel mundial [46], se convierte, la implementación del relave de la minería de agregados como reemplazo del cemento, en grandes porcentajes, en una alternativa no solo comercialmente competitiva, sino que además de gran impacto en el medio ambiente.

Por otra parte, la gama de usos de los bloques propuestos en este documento es amplia, tanto estructurales como no estructurales, dado que la norma NTC 4026 establece que las unidades de mampostería que cumplan con los requisitos y límites establecidos por esta norma, podrán también utilizarse para elaborar mampostería no estructural.

10.2. TRABAJOS FUTUROS

Dado el carácter puzolánico del relave, se recomienda realizar nuevos ensayos mecánicos a los 90 días de curado, con el fin de determinar de forma más amplia el desempeño de las mezclas con reemplazo en edades tardías.

Sumado a lo anterior, se aconseja someter los bloques a ensayos que verifiquen la durabilidad del material y su comportamiento al ser expuesto de forma prolongada ante agentes de intemperismo.

Dados los resultados de la resistencia de los bloques en altos contenidos de reemplazo, valdría la pena realizar de forma experimental nuevos ensayos a mezclas con aumentos graduales de reemplazo (por encima de R50), con el fin de encontrar el porcentaje más alto de reemplazo con el cual las características mecánicas de la unidad de mampostería sigan dentro de los límites establecidos por las normas 4026 y 4076.

Así mismo, se espera que los resultados de este estudio, sirvan como base en futuras investigaciones sobre el aprovechamiento de estos residuos en la elaboración de otros materiales como losetas, bordillos y adoquines, o sean implementados en proyectos de construcción de viviendas de interés social.

11. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Ministerio de Minas y Energía de Colombia., «ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL PIB MINERO- CUARTO TRIMESTRE DE 2017,» 26 Febrero 2018. [En línea]. Available: https://www.minminas.gov.co/documents/10192/23966843/231118_comportamiento_pib_iv_trim_2017.pdf/3618af12-9acd-417e-ae86-3d0fb2431e63.
- [2] El Tiempo, «Ambientalistas advierten sobre explotación minera en Cajamarca,» Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/consecuencias-ambientales-de-explotacion-minera-en-cajamarca-71226>. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [3] GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOAMBIENTAL TERRAE, «ANÁLISIS DESDE LA PERSPECTIVA DE AMENAZAS SOCIAMBIENTALES DE UNA MINA DE ORO A CIELO ABIERTO: CASO DE ESTUDIO LA COLOSA, CAJAMARCA (TOLIMA),» Febrero 2016. [En línea]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/302d3c_98963bf4a19340d89aa58c811748bd9.pdf. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [4] El Tiempo, «Minería sin brújula en Villavicencio,» Junio 2015. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15990600>. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [5] Agencia Nacional de Minería , «Caracterización de la actividad minera departamental,» Meta, Colombia., 2017.
- [6] J. M. L. D. C. Lorena N. Beltrán Rodríguez, «Emerging technologies for tailings disposal: opportunities for Colombian practice,» *Boletín de Ciencias de la Tierra* , nº 44, pp. 5-20, 2018.
- [7] J. A. M. Ortiz, Revisión Bibliográfica para el Análisis de los Impactos Ambientales Generados por la Extracción de Material de Arrastre en Cuerpos de Agua – Caso de Estudio: Río Purnio., Manizales, Caldas.: Universidad Católica de Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2017.
- [8] F. Vargas y M. Lopez, «Development of a new supplementary cementitious material from the activation of copper tailings: Mechanical performance and analysis of factors,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 182, pp. 427-436, 2018.
- [9] G. A. Anicama Acosta, «ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EMPLEO DE MATERIALES DE DESECHO DE PROCESOS MINEROS EN APLICACIONES PRÁCTICAS CON PRODUCTOS CEMENTICIOS,» Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2010.
- [10] G. P. Ramos, «La minería colonial y republicana,» Banco de la República, Colombia., 2017. [En línea]. Available: <http://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-151/la-mineria-colonial-y-republicana>. [Último acceso: Febrero 2019].
- [11] Ministerio de Minas y Energía, Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, Explotación de Materiales de Construcción: Canteras y Material de Arrastre, Colombia, 2013.
- [12] L. GUTIÉRREZ DE LÓPEZ, «EL CONCRETO Y OTROS MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN,» Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales., Manizales, 2003.
- [13] A. M. d. D. Ambiental, «Vista General de la Actividad Minera y sus Impactos,» de *Guía para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros*, 2010, pp. 3-20.

- [14] G. . A. Lira Cifuentes y R. H. Osses Peña, «Factibilidad del reemplazo del agregado fino por arenade relave en el hormigón.,» *Revista Científico Tecnológica Departamento Ingeniería de Obras Civiles- RIOC.* , vol. 3, pp. 50-58, 2013.
- [15] A. A. R. y. S. L. Flores, «Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas,» *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial* , vol. I, nº 13, pp. 75-82, 2010.
- [16] A. M. H. V. y. G. G. M. M, MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE MAMPOSTERÍA DE CONCRETO, Mexico, D.F: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, 2001.
- [17] Ministerio de Minas y Energía , Glosario Técnico Minero, Bogotá, 2003.
- [18] M. P. Y. H. R. Ph.D. Rogelio Monreal Saavedra, Mi México es Minero, México D.F: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México A.C., 2015.
- [19] A. N. D. L. A. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, TÉRMINOS DE REFERENCIA PARA LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL EXPLOTACIÓN PROYECTOS MINEROS, Bogotá: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales , 2014.
- [20] Ministerio de minería gobierno de Chile, «Glosario Minero,» [En línea]. Available: <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-r/relave/>. [Último acceso: Febrero 2019].
- [21] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial., «Decreto 838 del 2005,» 2005.
- [22] ICONTEC., Norma Tecnica Colombiana. Ingeniería civil y arquitectura. Mampostería de concreto. Términos y definiciones., Bogotá D.C: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., 1999.
- [23] Metroblock, «Metroblock Web Site.,» 2019.. [En línea]. Available: <https://metroblock.com.co/productos/>.
- [24] J. Valdés, «Desempeño de materiales cementantes suplementarios en resistencia a compresión e hidratación en pastas de cemento.,» Villavicencio, 2019.
- [25] ICONTEC, Norma Tecnica Colombiana. Ingeniería civil y arquitectura. Terminología relativa al concreto y sus agregados., Bogotá D.C: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., 1999.
- [26] S. M. Mogollón Lozano y C. H. Carrillo Castañeda, «EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LODOS PROVENIENTES DE LA PTAR DE LA COMPAÑÍA INTERNACIONAL DE ALIMENTOS AGROPECUARIOS (CIALTA S.A.S) COMO ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO PARA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS CERÁMICOS.,» Universidad de la Salle, Bogota D.C., 2016.
- [27] H. M. Shahul y S. A. S. S. , «Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate.,» *Engineering and Applied Sciences.*, vol. 4, nº 4, 2009.
- [28] N. H. B. y S. C, «Compressed Stabilized Earth Blocks Using Iron Mine Spoil Waste - An Explorative Study.,» *Procedia Engineering*, vol. 180, pp. 1203-1212, 2017.
- [29] M. M y N. S, «The viability of using the Witwatersrand gold mine tailings for brickmaking,» *Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 115, nº 4, 2015.

- [30] J. G. Soto Trinidad , «ELABORACIÓN DE ADOQUINES CERÁMICOS CON EL USO DE PUZOLANAS, ASERRÍN Y RELAVE MINERO DE TICAPAMPA, RECUAY - ANCASH,» Universidad César Vallejo, Lima, 2017.
- [31] J. N. DE SANT'ANA FILHO, «ESTUDOS DE REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DAS BARRAGENS DE MINÉRIO DE FERRO PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS E FABRICAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS.,» Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais., Belo Horizonte, 2013.
- [32] . L. E. Rojas Huamaní y L. E. Ventura Huaman , «UTILIZACIÓN DEL RELAVE MINERO PARA LA ELABORACIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO TIPO ENSAMBLABLE,» Universidad Nacional Huancavelica , Huancavelica , 2017.
- [33] J. Modi, M. Aruna, S. Bharti y H. Vardhan, «Utilization of Mining Wastes in Manufacturing of Bricks.,» *Research gate.*, 2014.
- [34] Asociación Colombiana de Ingeniería Civil., Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Título D: Mampostería estructural., Bogotá D.C: Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial., 2010.
- [35] ICONTEC, «Norma Técnica Colombiana. Ingeniería civil y arquitectura. Determinación de la contracción lineal por secado en unidades- bloques y ladrillos- de concreto, para mampostería.,» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., Bogotá D.C, 1996.
- [36] ICONTEC., Norma Técnica Colombiana. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural., Bogotá D.C.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., 1997.
- [37] ICONTEC., Norma Técnica Colombiana. Prefabricados de concreto. Muestreo y ensayo de prefabricados de concreto no reforzado, vibrocompactados., Bogotá D.C: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., 2001.
- [38] ICONTEC, «Norma Técnica Colombiana. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de concreto para mampostería no estructural.,» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., Bogotá D.C, 2017.
- [39] ICONTEC, «Norma Técnica Colombiana. Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el sitio de trabajo.,» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. , Bogotá D.C, 2017.
- [40] ICONTEC, «Norma Técnica Colombiana. Concretos. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.,» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., Bogotá D.C., 2018.
- [41] ICONTEC, «Norma técnica colombiana. Concretos. Especificaciones de los agregados para concretos.,» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., Bogotá D.C, 2018.
- [42] Alcaldía de Villavicencio., «Información General del Municipio de Villavicencio.,» 2016. [En línea]. Available: http://www.villavicencio.gov.co/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=1649&Itemid=209.
- [43] Y. Cruz, «Villavicencio1234,» 2011. [En línea]. Available: <http://villavicencio1234.blogspot.com>. [Último acceso: 2019].
- [44] Google Earth, «Ubicación de la Mina Zafiro en el municipio de Villavicencio.,» 2019.

- [45] Malvern Panalytical, «Malvern Panalytical Web Site.,» [En línea]. Available: <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/x-ray-fluorescence>. [Último acceso: Junio. 2019.].
- [46] J. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino y E. Gartner, «Sustainable development and climate change initiatives.,» *Cement and Concrete Research.*, vol. 38, nº 2, pp. 115-127, 2008.

ANEXOS.

ANEXO A. Resultados del ensayo de fluorescencia de rayos X (RXF).

ANEXO B. Ensayos de caracterización física.

ANEXO B.1. Granulometría de la arena.

ANEXO B.2. Granulometría por tamizado del relave.

ANEXO B.3. Granulometría por hidrómetro del relave.

ANEXO B.4. Peso específico del relave y la arena.

ANEXO B.5. Contenido de humedad del relave y la arena.

ANEXO B.6. Límites de consistencia del relave.

ANEXO C. Diseño de mezclas del proyecto.

ANEXO D. Resumen de los ensayos de resistencia, absorción de agua y desviación estándar de los datos.

ANEXO E. Informe de los ensayos de resistencia y absorción de agua a los 7 días.

ANEXO F. Informe de los ensayos de resistencia y absorción de agua a los 14 días.

ANEXO G. Informe de los ensayos de resistencia y absorción de agua a los 28 días.

ANEXO H. Análisis económico del proyecto.

ANEXO I. Cotización del agregado, coste de transporte de material y cemento.