

**BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA CON CÁÑAMO DE CANNABIS:
INNOVACIÓN EN CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE**

**DANIEL ESTEBAN PINTO CHAPARRO
VIVIANA VALENTINA VILBAO ROMERO**

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**DIRECTOR:
(C) PHD. JUAN RICARDO PÉREZ CUERVO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TUNJA

2025

Dedicatoria

Primeramente, agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de siempre seguir; aunque en momentos lo vi muy difícil jamás renuncié a mi sueño más grande. A mis padres, que han sido mi mayor fortuna y mi mejor equipo; por estar ahí para mí en todo momento y por tener las palabras sabias en los momentos difíciles. Este logro va dedicado a ellos. A mi hermano, por estar siempre que lo necesito y por su apoyo en todo este proceso largo. A mi pareja que me estuvo acompañando una parte de mi carrera, por ser mi compañero incondicional en este camino, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por su paciencia, motivación y amor constante que me impulsaron a no rendirme nunca. Por enseñarme lo que es la paciencia en muchos aspectos y por acompañarme en el transcurso de los días. A mi abuelo José quien, aunque no estuvo presente físicamente para acompañarme, sé que desde el cielo me guió y me dio fuerzas para no rendirme. Este triunfo también es un homenaje a su memoria y al amor que dejó en mi vida.

Viviana Valentina Vilbao Romero

Hoy culminó mi carrera profesional, y quiero agradecer primero a Dios por ser mi guía y fortaleza en cada momento en este camino, por darme mucha paciencia, sabiduría y fe para no rendirme en cada momento malo.

A mis padres, por su amor incondicional, por darme ejemplo de perseverancia y por cada consejo dado en este camino, sabiendo que no era nada fácil siempre confiaron en mí, donde se vio reflejado tanto sacrificio, fue un proceso duro, pero sin ustedes esto no sería posible, gracias a ello estoy donde estoy.

A mi hermano, que también es una parte fundamental en este proceso, donde me enseñó demasiadas cosas, muchos aprendizajes, y lo más valioso fue que siempre estuvo para mí, siempre fue un apoyo incondicional.

A Thomi perruno, mi compañero fiel, que siempre con su presencia iluminó mis días más difíciles, tantas tardes como también noches de traspasó estuvo ahí, acompañándome.

A mi novia, agradecerle por siempre estar en los buenos y malos momentos, en especial los malos momentos donde me daba ánimo y fuerza para no rendirme, por confiar en mí y creer en mis capacidades, gracias por estar en este proceso tan importante para mí.

A toda mi familia, por creer en mí, por cada palabra de ánimo, y por estar siempre en este proceso. Este logro no es solo mío, es de todos ustedes.

A mis profesores gracias por haber compartido su conocimiento, su dedicación y ayuda en todos los obstáculos de la trayectoria de mi carrera, siempre ocuparon un lugar especial en mi vida.

Te pido Dios que me sigas acompañando en mi vida profesional, personal y familiar.

Con mucho amor y agradecimiento. Daniel Pinto Chaparro.

Agradecimientos

Deseamos manifestar nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas que colaboraron de forma relevante en la elaboración de esta tesis. En primer lugar, queremos agradecer a nuestro director de tesis, el ingeniero Juan Ricardo Pérez Cuervo, quien nos orientó durante todo este proceso con su paciencia y sus conocimientos. Su apoyo y compromiso fueron fundamentales para que este trabajo se llevara a cabo con éxito.

A nuestras familias, por ser nuestra mayor fuente de inspiración y fortaleza. Gracias por su amor incondicional, su apoyo constante y por brindarnos las herramientas necesarias para alcanzar nuestras metas.

A nuestros amigos y colegas, quienes hicieron que este camino fuera más llevadero con su compañía, sus consejos y sus palabras de aliento. Y, por último, queremos agradecer sinceramente a todos los que de alguna manera ayudaron a nuestro crecimiento profesional y personal.

Índice De Contenido

Agradecimientos.....	4
Índice De Contenido.....	5
Índice de Tablas.....	7
Índice de Ilustraciones.....	8
Índice de Ecuaciones.....	9
Lista de abreviaturas y siglas.....	10
Resumen.....	11
Introducción.....	13
1. Problema de Investigación.....	15
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Pregunta de investigación.....	17
1.3 Justificación.....	17
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo general.....	19
1.4.2 Objetivos específicos.....	19
2. Estado del arte.....	19
3. Metodología.....	36
3.1. Consistencia y plasticidad de suelos: límite líquido y límite plástico (INV E-126, NTC 125).....	36
3.2. Granulometría por tamizado (INV E-123, NTC 1522).....	38
Granulometría Por Lavado (Tamiz #200) (INV E-124, NTC 1522).....	39
3.3. Gravedad Específica De Suelos Finos (INV E-128-07).....	39
3.4. Contenido de humedad natural (INV E-122-13).....	41
3.5. Proctor modificado (INV E-142-13).....	43
3.6. Hidrometría (NTC 1522).....	45
3.7. Dosificación.....	46
3.7.1. DOSIFICACIÓN 5%:.....	48
3.7.2. DOSIFICACIÓN 10%:.....	48
3.7.3. DOSIFICACIÓN 15%:.....	49
3.8. Elaboración de bloques de tierra comprimida (BTC).....	50
3.9. Ensayo de compresión.....	52
3.10. Propiedades mecánicas.....	55
3.11. NTC 5324.....	55
3.12. Variables fórmula de dosificación racional BTC.....	56
4. Análisis y resultados.....	59
4.1. Granulometría.....	60

4.2. Límite De Atterberg	64
4.3. Gravedad Específica	67
4.4. Hidrometría INV E-124.....	71
4.5. Diseño de mezcla.....	75
4.6. Ensayo de Proctor Estándar INV E-142-13.....	76
4.6.1. Proctor 5%	76
4.6.2. Proctor 10%	78
4.6.3. Proctor 15%	81
4.7. Elaboración de Bloques de tierra Comprimida (BTC).....	84
4.8. Ensayo a compresión Bloques De Tierra Comprimida (BTC)	86
4.8.1. 5% Sin Cáñamo (14 Días)	86
4.8.2. 5% Con Cáñamo (14 Días).....	89
4.8.3. 5% Sin Cáñamo (28 Días)	92
4.8.4. 5% Con Cáñamo (28 Días).....	95
4.9. Determinación Analítica de la Resistencia a Compresión al 10%.....	97
4.9.1. 15% Sin cáñamo (14 Días)	100
4.9.2. 15% Con cáñamo (14 Días).....	101
4.9.3. 15% Sin cáñamo (28 Días).....	104
4.9.4. 15% Con cáñamo (28 Días).....	105
5. Conclusiones	108
6. Alcances y Límites	110
7. Proyecciones	110
8. Recomendaciones de aplicación práctica.....	111
7. Glosario	111
8. Referencias.....	114

Índice de Tablas

Tabla 1: Consistencia y plasticidad de suelos: Límite Líquido y Límite Plástico	37
Tabla 2: Datos Granulometría.....	39
Tabla 3: Gravedad específica de suelos finos	41
Tabla 4: Contenido de Humedad.	42
Tabla 5: Ensayo Proctor	44
Tabla 6: Ensayo Hidrometría	45
Tabla 7: Dosificación de las mezclas y número de muestras ensayadas.....	49
Tabla 8: Datos Ensayo Granulometría	61
Tabla 9: Datos Límite Líquido.....	64
Tabla 10: Datos Límite Plástico.....	66
Tabla 11: Datos Ensayo Gravedad Específica (picnómetro)	68
Tabla 12: Datos ensayo Hidrometría.	71
Tabla 13: Tabla De Cálculos Ensayo Hidrometría	73
Tabla 14: Datos Ensayo Proctor 5%	76
Tabla 15: Corrección de Humedad 5%	76
Tabla 16: Datos Ensayo Proctor 10%	78
Tabla 17: Corrección de Humedad 10%.....	79
Tabla 18: Datos Ensayo Proctor 15%	81
Tabla 19: Corrección de Humedad 15%.....	81
Tabla 20: Resumen datos obtenidos.	85
Tabla 21: Dimensiones BTC 5% Cemento Sin Cáñamo (14 días)	87
Tabla 22: Dimensiones BTC 5% Cemento Con Cáñamo (14 días).....	89
Tabla 23: Dimensiones BTC 5% Cemento Sin Cáñamo (28 días)	93
Tabla 24: Dimensiones BTC 5% Cemento Con Cáñamo (28 días).....	95
Tabla 25: Valores Estimados por Interpolación de la Resistencia a Compresión (10 % Cemento).....	98
Tabla 26: Dimensiones BTC 15% Cemento Sin Cáñamo (14 días)	100
Tabla 27: Dimensiones BTC 15% Cemento Con Cáñamo (14 días).....	101
Tabla 28: Dimensiones BTC 15% Cemento Sin Cáñamo (28 días)	104
Tabla 29: Dimensiones BTC 15% Cemento Con Cáñamo (28 días).....	105

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Artículo 1 Estado del Arte.....	20
Ilustración 2. Artículo 2 Estado del Arte.....	20
Ilustración 3. Artículo 3 Estado del Arte.....	21
Ilustración 4. Artículo 4 Estado del Arte.....	21
Ilustración 5. Artículo 5 Estado del Arte.....	22
Ilustración 6. Artículo 6 Estado del Arte.....	22
Ilustración 7. Artículo 7 Estado del Arte.....	23
Ilustración 8. Artículo 8 Estado del Arte.....	23
Ilustración 9. Artículo 9 Estado del Arte.....	24
Ilustración 10. Artículo 10 Estado del Arte.....	24
Ilustración 11. Artículo 11 Estado del Arte.....	25
Ilustración 12. Artículo 12 Estado del Arte.....	26
Ilustración 13. Artículo 13 Estado del Arte.....	26
Ilustración 14. Artículo 14 Estado del Arte.....	27
Ilustración 15. Artículo 15 Estado del Arte.....	27
Ilustración 16. Artículo 16 Estado del Arte.....	27
Ilustración 17. Artículo 17 Estado del Arte.....	28
Ilustración 18. Artículo 18 Estado del Arte.....	28
Ilustración 19. Artículo 19 Estado del Arte.....	29
Ilustración 20. Artículo 20 Estado del Arte.....	30
Ilustración 21. Artículo 21 Estado del Arte.....	30
Ilustración 22. Artículo 22 Estado del Arte.....	31
Ilustración 23. Artículo 23 Estado del Arte.....	31
Ilustración 24. Artículo 24 Estado del Arte.....	32
Ilustración 25. Artículo 25 Estado del Arte.....	32
Ilustración 26. Artículo 26 Estado del Arte.....	33
Ilustración 27. Artículo 27 Estado del Arte.....	33
Ilustración 28. Artículo 28 Estado del Arte.....	34
Ilustración 29. Artículo 29 Estado del Arte.....	34
Ilustración 30. Artículo 30 Estado del Arte.....	35
Ilustración 31. Consistencia y plasticidad de suelos: límite líquido y límite plástico	37
Ilustración 32: Proceso de ensayo de Granulometría	38
Ilustración 33. Gravedad específica de suelos finos.....	40
Ilustración 34. Gravedad específica de suelos finos.....	40
Ilustración 35. Contenido de Humedad	42
Ilustración 36: Ensayo Proctor	43
Ilustración 37. Ensayo Proctor	44
Ilustración 38: Preparación Dosificación	47
Ilustración 39. Dimensiones BTC	47
Ilustración 40. Máquina Bloques de Tierra Comprimida (BTC).....	51
Ilustración 41. Maquinaria para realizar Bloques de Tierra Comprimida (BTC)	51
Ilustración 42. Bloques de Tierra Comprimida	52

Ilustración 43. Secado Bloques de Tierra Comprimida.....	53
Ilustración 44. Secado Bloques de Tierra Comprimida.....	54
Ilustración 45. Ensayo Compresión Bloques de Tierra Comprimida.....	54
Ilustración 46. Ensayo Compresión Bloques de Tierra Comprimida.....	55
Ilustración 47. _ Curva Granulométrica	62
Ilustración 48. _ Ensayo Límite Líquido.....	65
Ilustración 49. Gráfica Ensayo Hidrometría.....	74
Ilustración 50. Gráfica Densidad Seca Proctor 5%	78
Ilustración 51. Gráfica de Densidad Proctor 10%	80
Ilustración 52. Gráfica de Densidad Seca Proctor 10%.....	81
Ilustración 53. Gráfica de Densidad Proctor 15%	83
Ilustración 54. Gráfica de Densidad Seca Proctor 15%.....	84
Ilustración 55. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 5% Cemento Sin Cáñamo (14 días)	88
Ilustración 56. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 5% Cemento Con Cáñamo (14 días)	91

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1.	56
Ecuación 2.	57
Ecuación 3.	58
Ecuación 4.	59
Ecuación 5.	67
Ecuación 6.	67
Ecuación 7.	69
Ecuación 8.	100
Ecuación 9.	100

Lista de abreviaturas y siglas

BTC: Bloques de Tierra Comprimida.

NSR-10: Norma Sismo Resistente 2010.

NTC: Normas Técnicas Colombianas.

INV-E: Normas de ensayo del Instituto Nacional de Vías.

CO₂: Dióxido de carbono.

CEB: Compressed Earth Blocks (equivalente en inglés a BTC).

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

RCD: Residuos de Construcción y Demolición.

CINVA-RAM: Prensa manual para BTC.

Resumen

Este estudio propone que los bloques de tierra comprimida (BTC) con fibras de cáñamo de Cannabis se apliquen como una alternativa sostenible en lugar de los materiales tradicionales para la construcción. La investigación surge por la necesidad de reducir el enorme impacto medioambiental que genera la industria, que utiliza muchos recursos y produce un alto volumen de CO₂. El cáñamo, una variedad de la planta que no tiene efectos psicoactivos, se caracteriza por sus capacidades mecánicas y térmicas, además de su capacidad para absorber carbono. Por estas razones, se trata de un insumo renovable con un impacto ambiental mínimo.

El método empleó la caracterización de suelos por medio de pruebas en laboratorio, la creación de mezclas con distintas dosis de cemento y cáñamo, la producción de prototipos

BTC y el análisis de su resistencia a compresión a las dos semanas y al mes. Los hallazgos indican que el comportamiento y la ligereza de los bloques mejoran con la incorporación de cáñamo, logrando resistencias de hasta 3,37 MPa, las cuales satisfacen las regulaciones técnicas internacionales para usos no estructurales y construcciones de altura baja. El análisis concluye que, desde un punto de vista ambiental y técnico, el uso de cáñamo en BTC es factible. Esto contribuye a la innovación en la construcción sostenible al reducir el consumo de recursos convencionales y fomentar una transición hacia construcciones más eficientes y respetuosas con el medioambiente.

Abstract

This study proposes that compressed earth blocks (CEB) with cannabis hemp fibers be applied as a sustainable alternative instead of traditional construction materials. The research arises from the need to reduce the enormous environmental impact generated by the industry, which uses many resources and produces a high volume of CO₂. Hemp, a variety of plants that has no psychoactive effects, is characterized by its mechanical and thermal properties, as well as its ability to absorb carbon. For these reasons, it is a renewable input with minimal environmental impact.

The method employed soil characterization through laboratory tests, the creation of mixtures with different doses of cement and hemp, the production of CEB prototypes, and the analysis of their compressive strength at two weeks and one month. The findings indicate that the

performance and lightness of the blocks improve with the incorporation of hemp, achieving strengths of up to 3,37 MPa, which meet international technical regulations for non-structural uses and low-rise construction. The analysis concludes that, from an environmental and technical standpoint, the use of hemp in CEB is feasible. This contributes to innovation in sustainable construction by reducing the consumption of conventional resources and fostering a transition toward more efficient and environmentally friendly buildings.

Introducción

En el contexto actual, la industria de la construcción afronta grandes desafíos vinculados al desempeño energético y a las consecuencias medioambientales de sus procesos. En este panorama, resulta prioritario avanzar hacia métodos constructivos más sostenibles, que reduzcan la huella ecológica sin comprometer la calidad ni la funcionalidad de las edificaciones.

En este sentido, el presente proyecto propone el estudio y desarrollo de un proceso constructivo que incorpore el cáñamo de *Cannabis Sativa L.* como componente fundamental en la elaboración de bloques de tierra comprimida (BTC). Aunque el cáñamo industrial ha demostrado, a nivel internacional, propiedades físicas, mecánicas y térmicas destacables como resistencia, durabilidad y capacidad de aislamiento, en Colombia su aplicación en la

construcción es prácticamente inexistente. Este vacío investigativo constituye el eje central de la tesis, ya que limita la adopción de soluciones más sostenibles en un sector altamente demandante de recursos naturales.

El uso del cáñamo en BTC representa una alternativa prometedora frente a los materiales tradicionales, dado que no requiere procesos de cocción en hornos, disminuye el consumo energético y aprovecha recursos locales. Además, contribuye a la mitigación del cambio climático gracias a la capacidad del cáñamo para capturar CO₂ durante su crecimiento.

La investigación se articula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), al fomentar la innovación mediante el desarrollo de materiales alternativos para la construcción. También se relaciona con el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al promover edificaciones con menor impacto ambiental y mayor eficiencia en el uso de recursos. De igual manera, contribuye al ODS 12 (Producción y consumo responsables), al incorporar materias primas renovables dentro de la cadena de valor constructiva. Finalmente, se vincula con el ODS 13 (Acción por el clima), al aportar a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a través del uso de materiales que capturan CO₂ durante su crecimiento y disminuyen el consumo energético en los procesos constructivos.

Asimismo, la propuesta se relaciona con los principios de la economía circular, ya que fomenta el aprovechamiento de recursos renovables, reduce la dependencia de materiales convencionales de alto impacto y plantea un modelo productivo que minimiza residuos.

En conclusión, este estudio busca aportar evidencia científica y técnica sobre la viabilidad del uso del cáñamo industrial en la elaboración de BTC en Colombia. De este modo, pretende sentar bases para un proceso constructivo más eficiente, sostenible y alineado con las tendencias globales de innovación y responsabilidad ambiental en el sector de la construcción.

1. Problema de Investigación

1.1 Planteamiento del problema

La industria de la construcción en Colombia se enfrenta a retos importantes en cuanto a sostenibilidad ambiental y eficiencia energética. De acuerdo con el informe Inventario Validado del sector ladrillero en Colombia (CAEM, CCAC, 2015), existen alrededor de 1378 fábricas de ladrillos y cerca de 2430 hornos para cocer arcilla en el país, que emiten aproximadamente 3 millones de toneladas de CO₂ al año.

Esta situación pone de manifiesto el gran impacto ambiental que tiene la producción de materiales de construcción tradicionales, como el ladrillo de arcilla y el hormigón convencional. En el caso de los ladrillos, su fabricación requiere hornos que consumen enormes cantidades de combustibles fósiles, lo que contribuye tanto a la contaminación del aire como al aumento del consumo energético.

Adicionalmente, la industria de la construcción es una de las principales consumidoras de recursos naturales como arena, grava y agua lo que genera efectos significativos sobre el

medio ambiente. Por ello, resulta urgente identificar soluciones sostenibles que minimicen el impacto ambiental y promuevan prácticas más responsables.

Una alternativa prometedora es el uso de fibras vegetales, entre ellas el cáñamo de Cannabis. El cáñamo industrial, una variedad de Cannabis Sativa L. con menos de 0,3% de THC, se ha convertido en un material sostenible para la construcción. Sus propiedades lo hacen atractivo: es resistente, duradero, biodegradable y funciona como un buen aislante térmico y acústico. Además, el cáñamo captura CO₂ durante su crecimiento, lo que refuerza sus beneficios ambientales.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, su uso en la construcción colombiana aún enfrenta obstáculos. Uno de los principales es la escasa investigación sobre su aplicación óptima en este sector, lo que limita su expansión.

En el país, las fibras naturales como el cáñamo son poco aprovechadas, pese a que representan beneficios tanto económicos como ambientales.

Otro problema radica en la normativa. Las normas de construcción actuales no contemplan este material, lo que dificulta su implementación a gran escala. Para garantizar un desempeño adecuado, el cáñamo requiere tratamientos como la alcalinización y la impregnación, que mejoran su adherencia a otros materiales. Asimismo, se necesitan estudios que comprueben su resistencia y durabilidad para avalar su viabilidad en la construcción.

La situación legal en Colombia también constituye un reto. Aunque el cáñamo industrial no tiene efectos psicoactivos, las regulaciones sobre su cultivo y uso son estrictas, debido a la confusión con el cannabis psicoactivo. Esto ha limitado la investigación y el desarrollo de productos basados en cáñamo en el país.

En conclusión, el cáñamo representa una alternativa sostenible y con gran potencial para la construcción en Colombia. No obstante, su aprovechamiento requiere superar barreras legales, normativas y técnicas. Este estudio busca aportar nuevas propuestas para la construcción con cáñamo, con el fin de reducir el impacto ambiental y fomentar prácticas más verdes y responsables.

1.2 Pregunta de investigación

- ¿Qué características físicas y mecánicas del cáñamo de Cannabis lo hacen idóneo para la construcción?
- ¿Qué tratamientos químicos o físicos se requieren para hacer al cáñamo más adherente y durable en la construcción?
- ¿Qué huella ecológica deja el cultivo y procesamiento del cáñamo de Cannabis en comparación con los materiales de construcción convencionales?
- ¿Qué técnicas constructivas actuales se pueden adaptar para utilizar como principal material el cáñamo de Cannabis?
- ¿Cómo pueden modificarse las normas y códigos de edificación para incorporar el cáñamo de Cannabis como material legítimo?

1.3 Justificación

En el mundo actual, con mayor conciencia ambiental y con una creciente exigencia de medidas ecológicas, la edificación se encuentra en un punto decisivo. Tradicionalmente se ha dependido de materiales como el hormigón y el ladrillo, altamente contaminantes. Esta situación plantea la necesidad de transformar la manera en que construimos, desarrollando alternativas respetuosas con el planeta sin sacrificar la calidad.

Este proyecto cobra relevancia porque ofrece alternativas con materiales renovables y amigables con el ambiente, respondiendo al reto de lograr una construcción más sostenible. Es fundamental recordar que este sector genera cerca del 40% de las emisiones globales de carbono y consume grandes cantidades de recursos naturales. Por ello, resulta clave integrar materiales ecológicos que permitan edificar de manera más responsable y adaptable.

La investigación se centra en el uso del cáñamo industrial como base para crear materiales de construcción sostenibles. Aunque esta planta ya se utiliza en otras áreas, su aplicación en el sector constructivo es novedosa. Lo innovador del proyecto radica en explorar y validar nuevas formas de aprovechar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del cáñamo, ampliando las opciones disponibles para la industria.

El cáñamo de Cannabis Sativa L. con bajo contenido de THC (menos del 0,3%) ha demostrado ser resistente, durable, biodegradable y un excelente aislante térmico y acústico. Además, durante su crecimiento captura CO₂, lo que lo convierte en un material con gran potencial para mitigar el cambio climático.

Impulsar la investigación y el desarrollo de materiales como el cáñamo no solo favorece la sostenibilidad en la construcción, sino que también promueve la economía circular, reduce los desechos del sector y abre nuevas oportunidades para la agricultura, al fomentar el cultivo de esta planta como un recurso valioso.

En conclusión, este proyecto constituye un aporte significativo a la innovación en la construcción sostenible. Establece bases sólidas para la incorporación de tecnologías y materiales más respetuosos con el medio ambiente, orientadas a edificaciones más eficientes, saludables y alineadas con los principios del desarrollo sostenible.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño técnico de bloques de tierra comprimida (BTC) con incorporación de cáñamo de cannabis, como alternativa para edificaciones sostenibles

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar la viabilidad del cáñamo industrial de Cannabis, como material complementario en la elaboración de bloques de tierra comprimida (BTC).
- Formular y elaborar bloques de tierra comprimida (BTC) con diferentes dosificaciones de cáñamo y cemento, a nivel de laboratorio.
- Determinar la resistencia a compresión de los bloques elaborados, evaluando su comportamiento mecánico a edades de 14 y 28 días.

2. Estado del arte

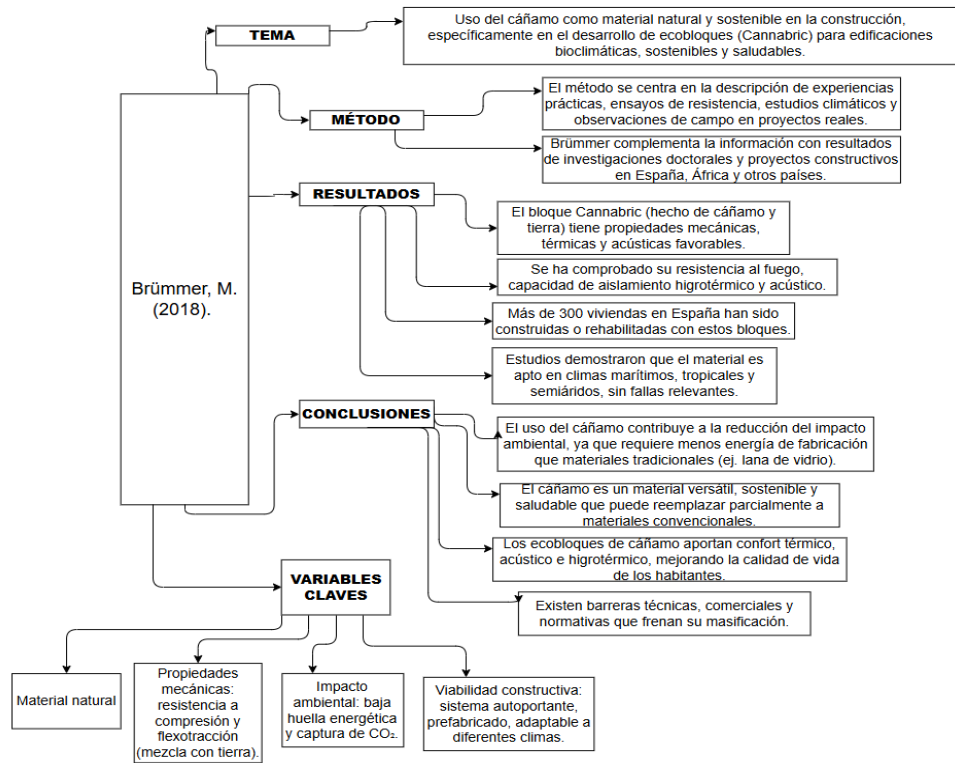


Ilustración 1. Artículo 1 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

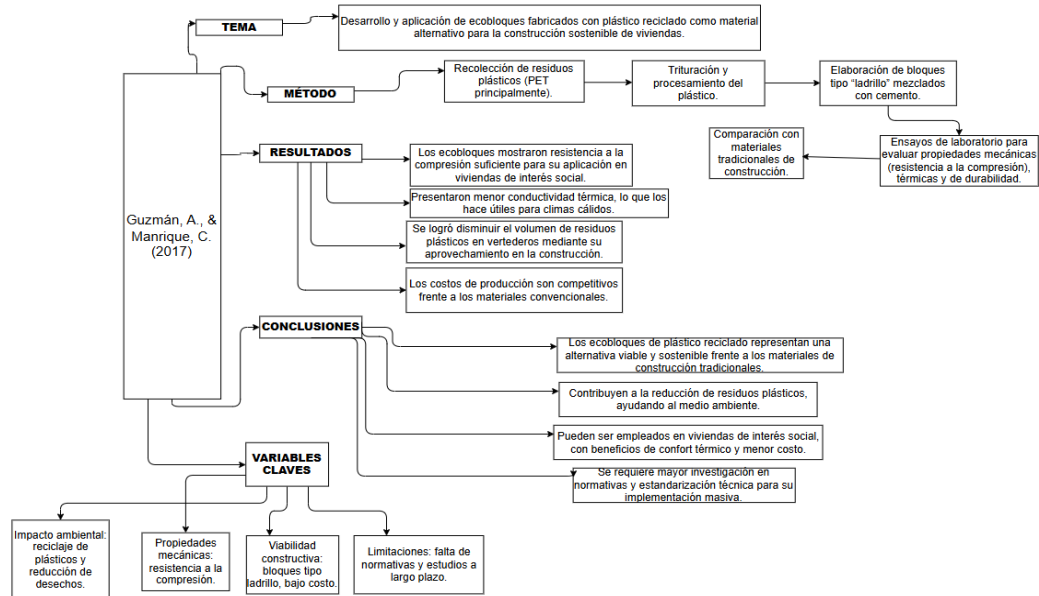


Ilustración 2. Artículo 2 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

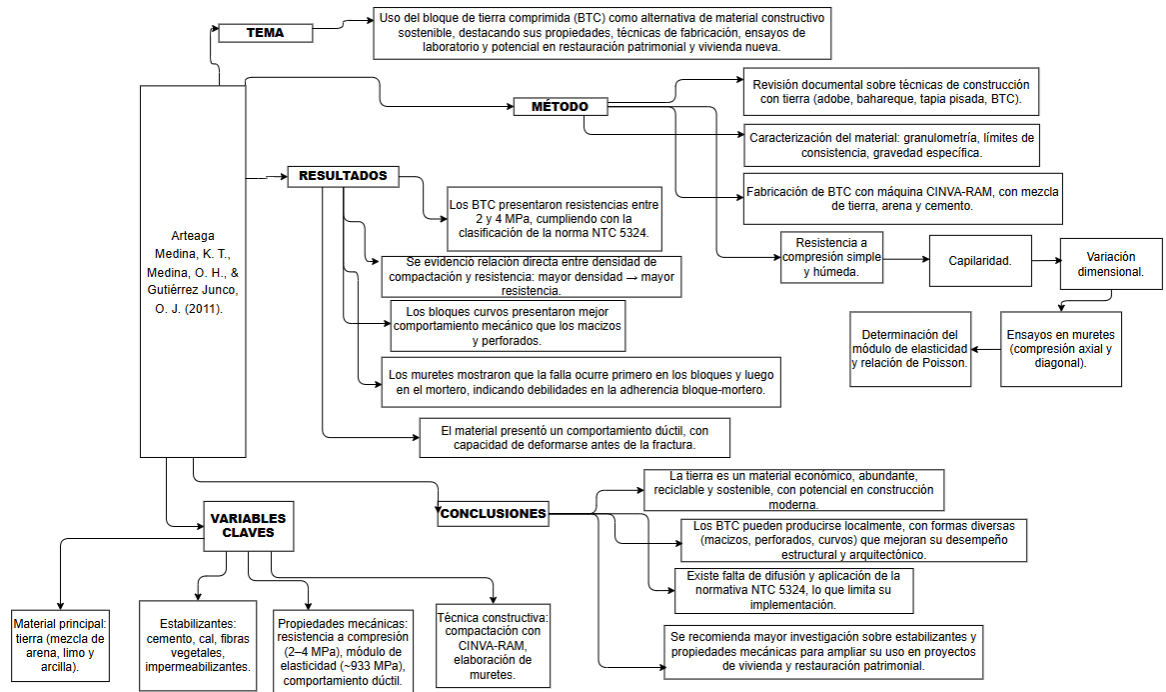


Ilustración 3. Artículo 3 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

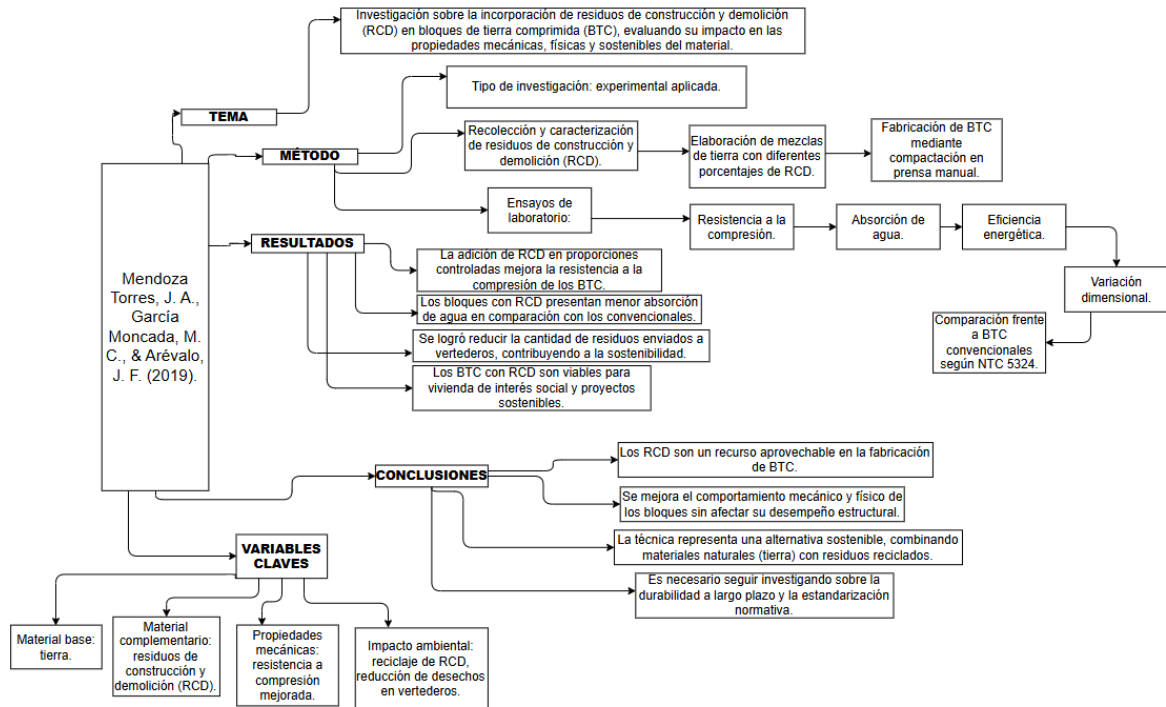


Ilustración 4. Artículo 4 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

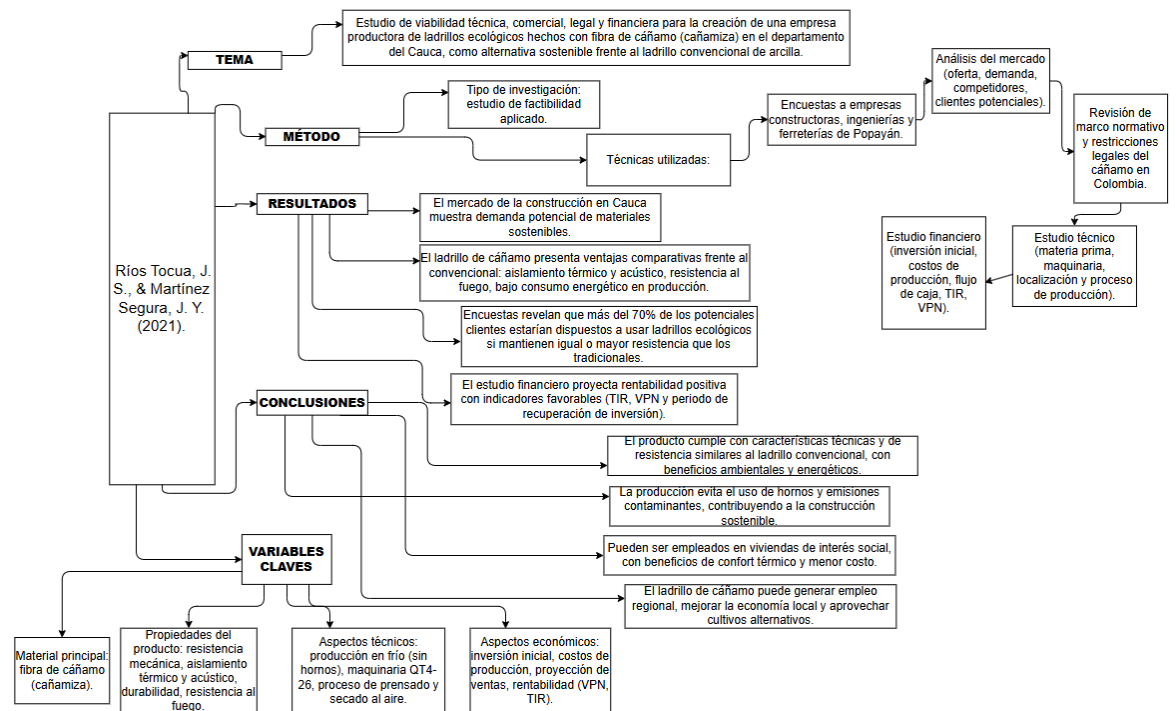


Ilustración 5. Artículo 5 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

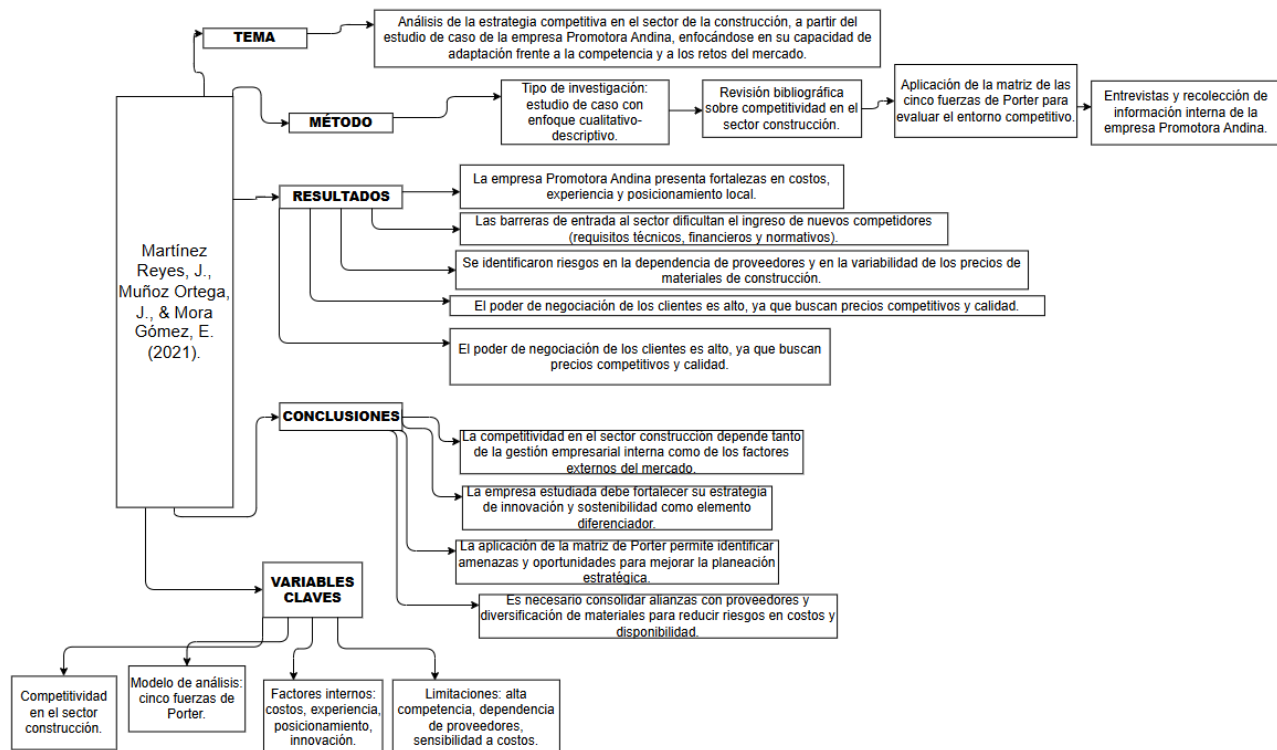


Ilustración 6. Artículo 6 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

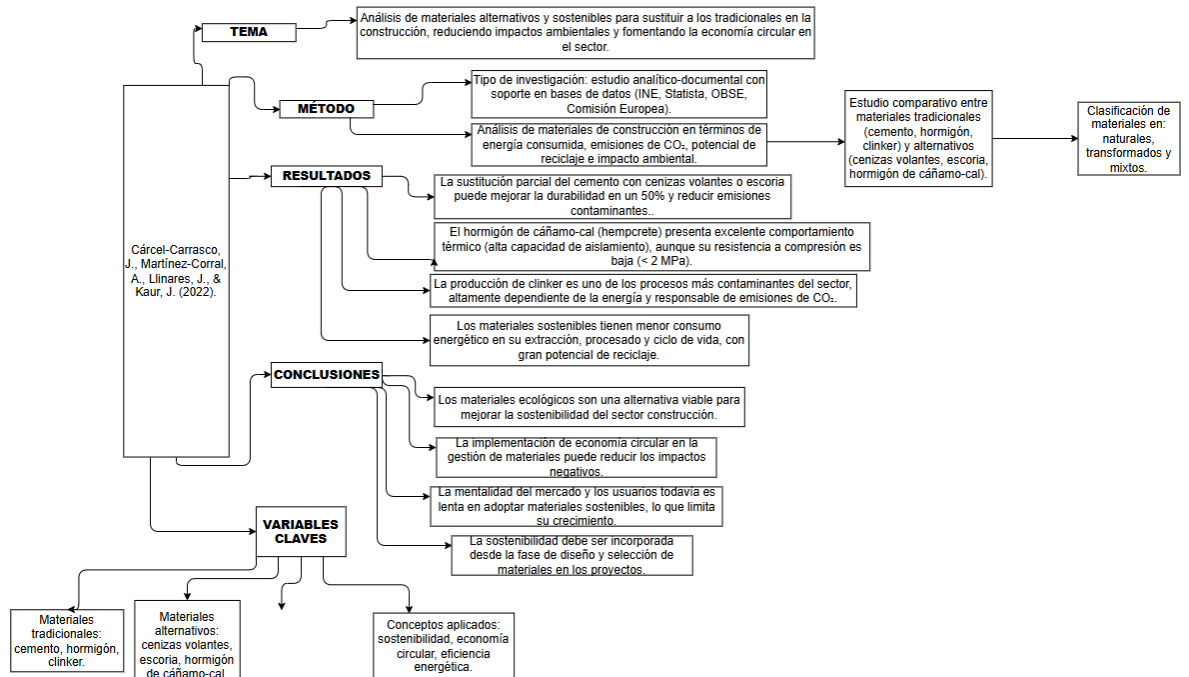


Ilustración 7. Artículo 7 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

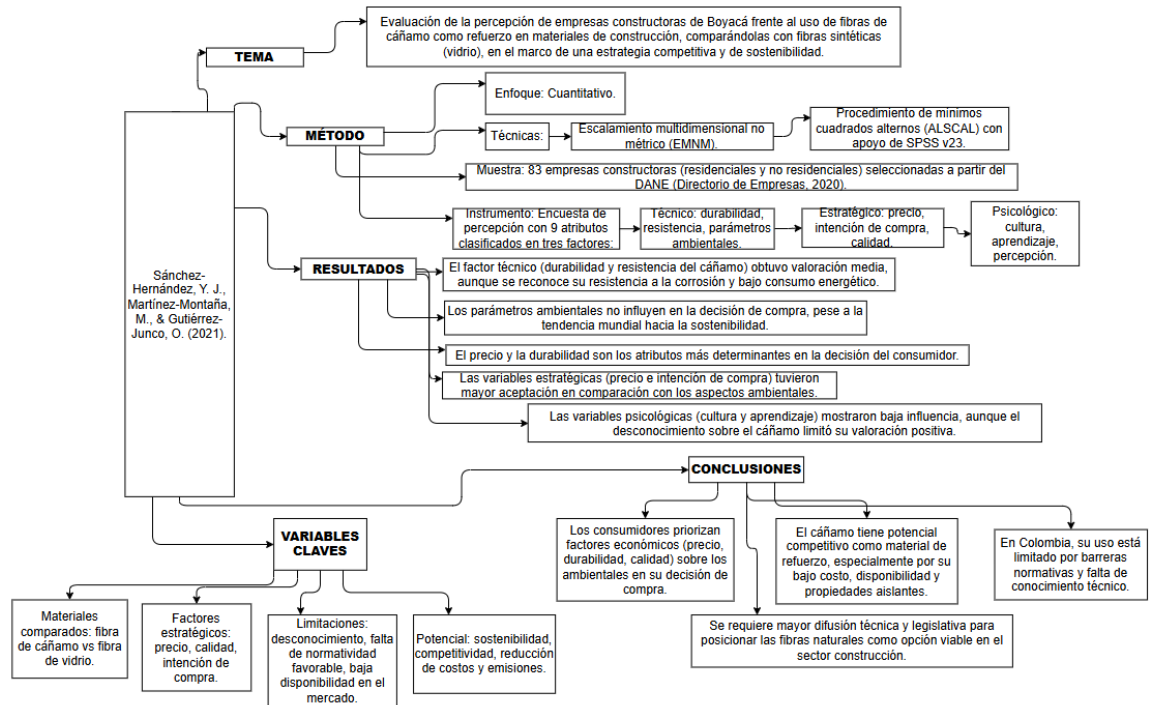


Ilustración 8. Artículo 8 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

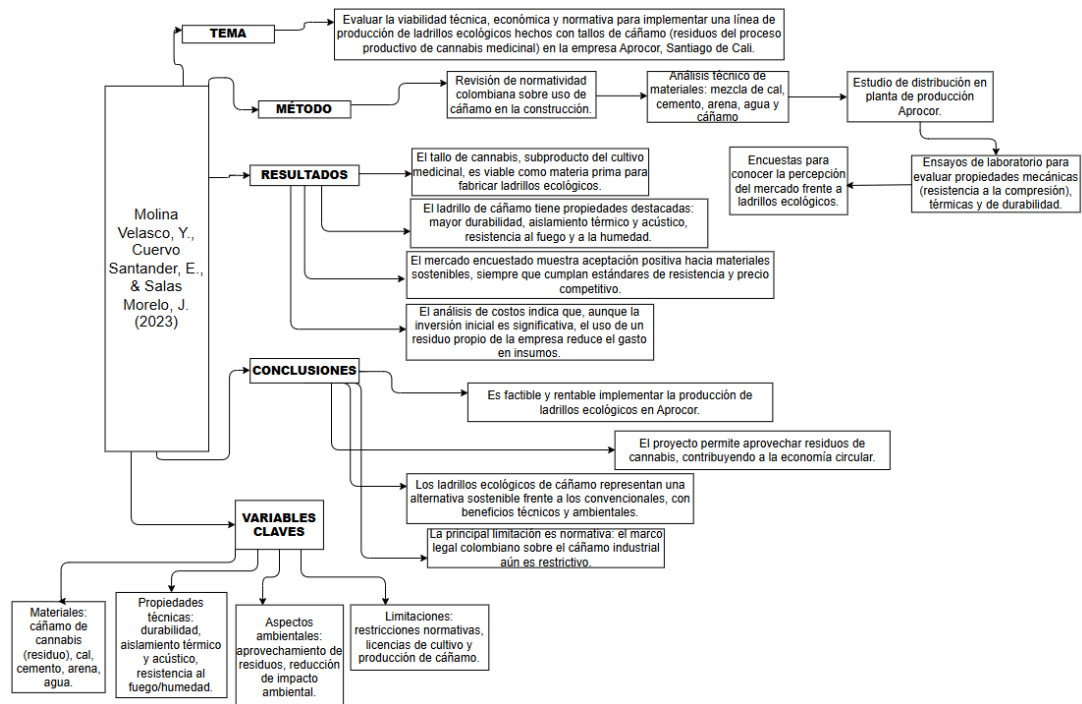


Ilustración 9. Artículo 9 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

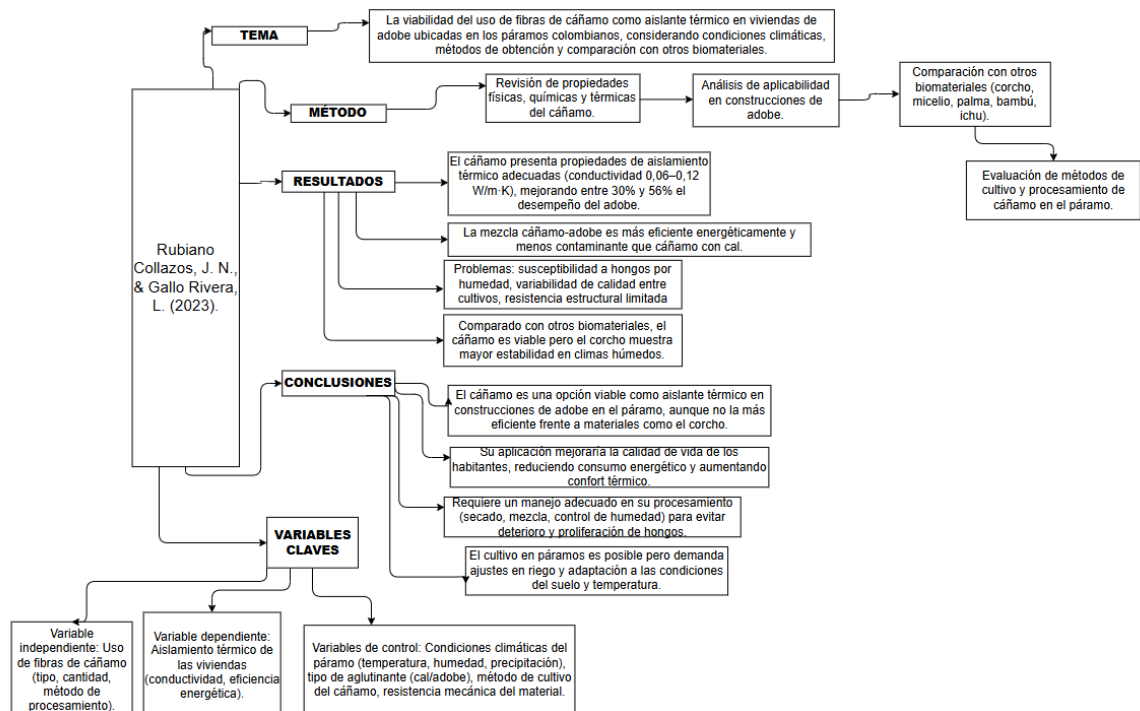


Ilustración 10. Artículo 10 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

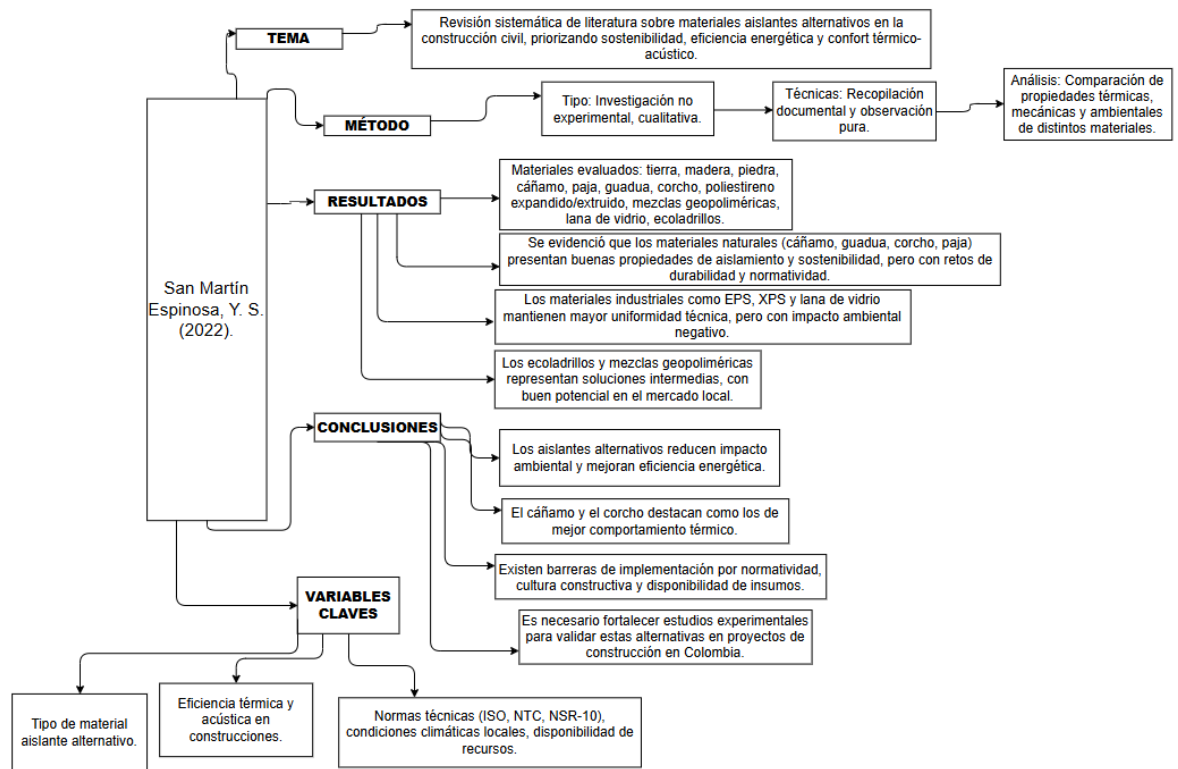


Ilustración 11. Artículo 11 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

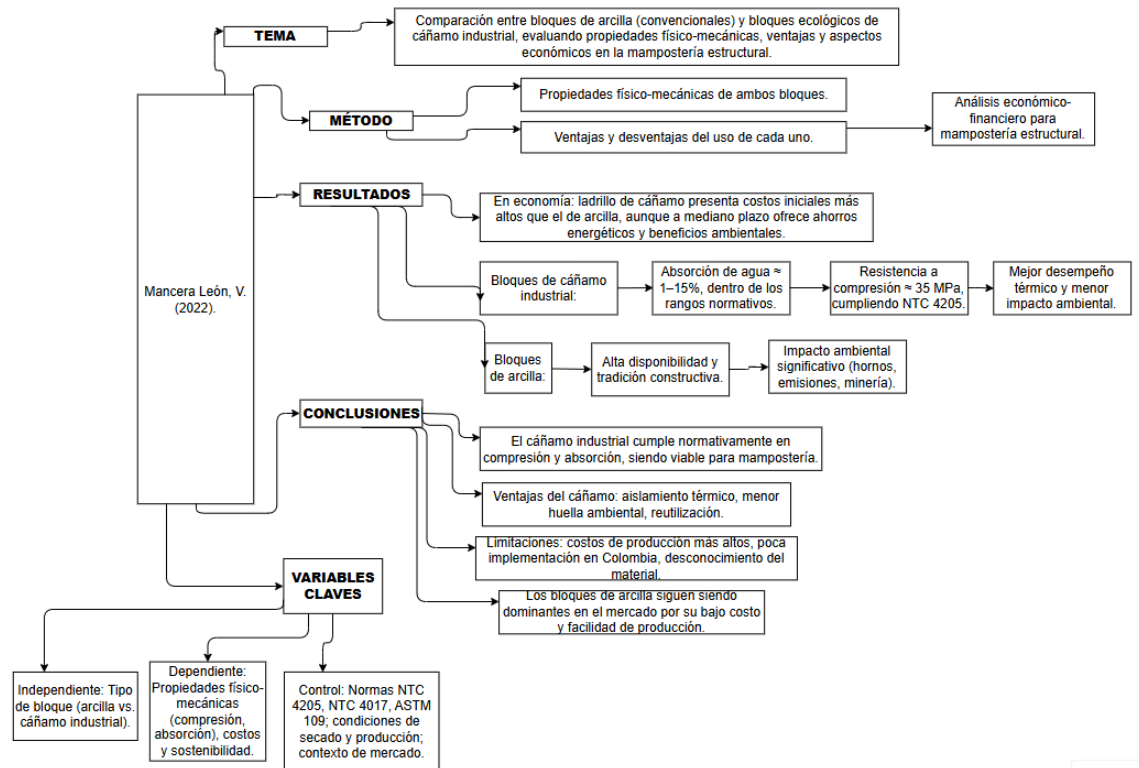


Ilustración 12. Artículo 12 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

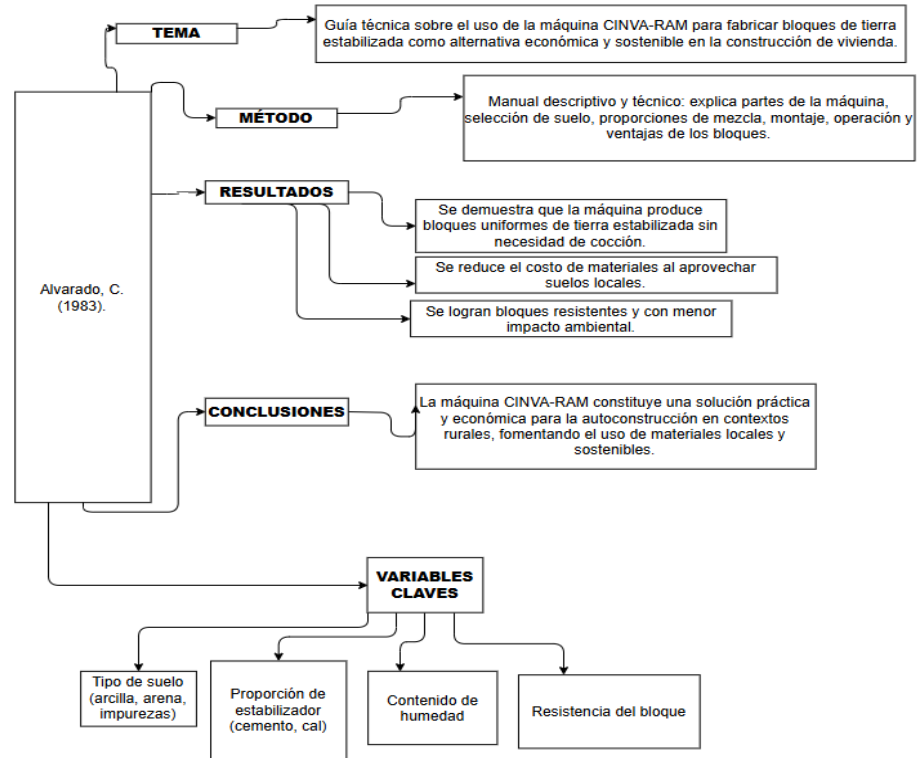


Ilustración 13. Artículo 13 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

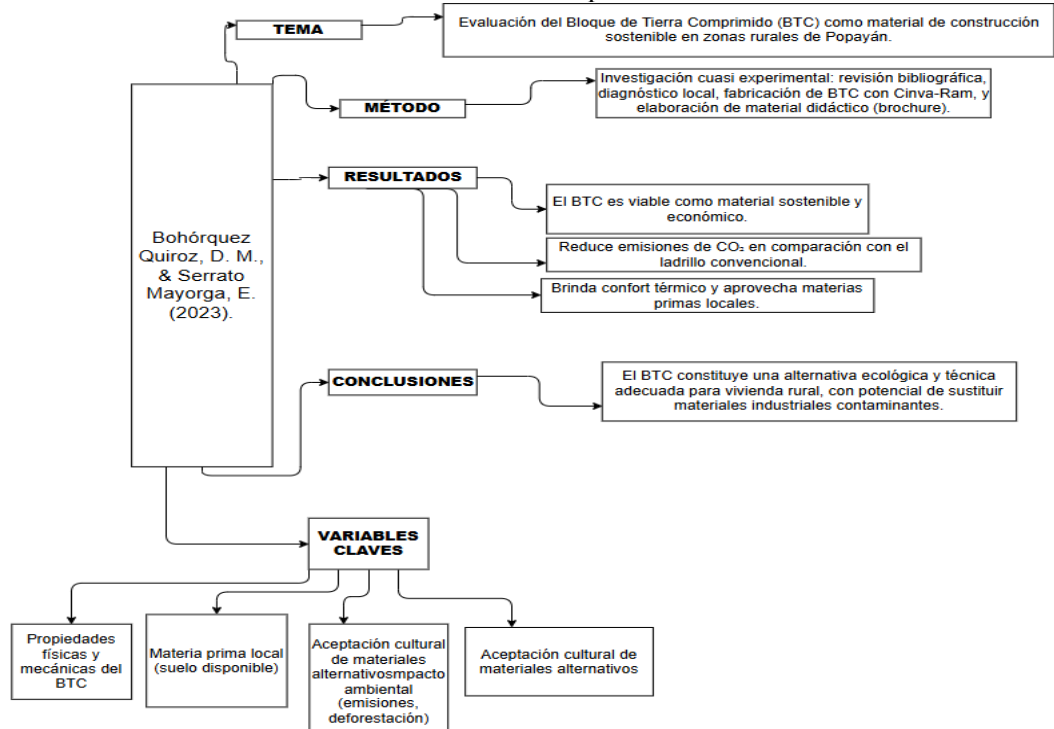


Ilustración 14. Artículo 14 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

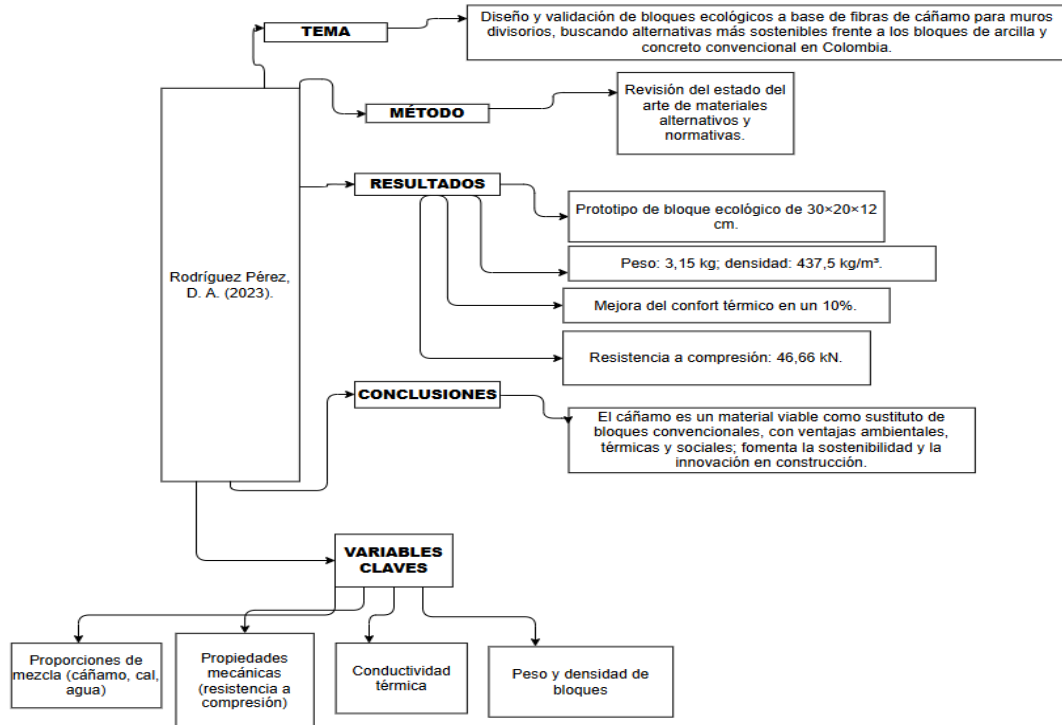


Ilustración 15. Artículo 15 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

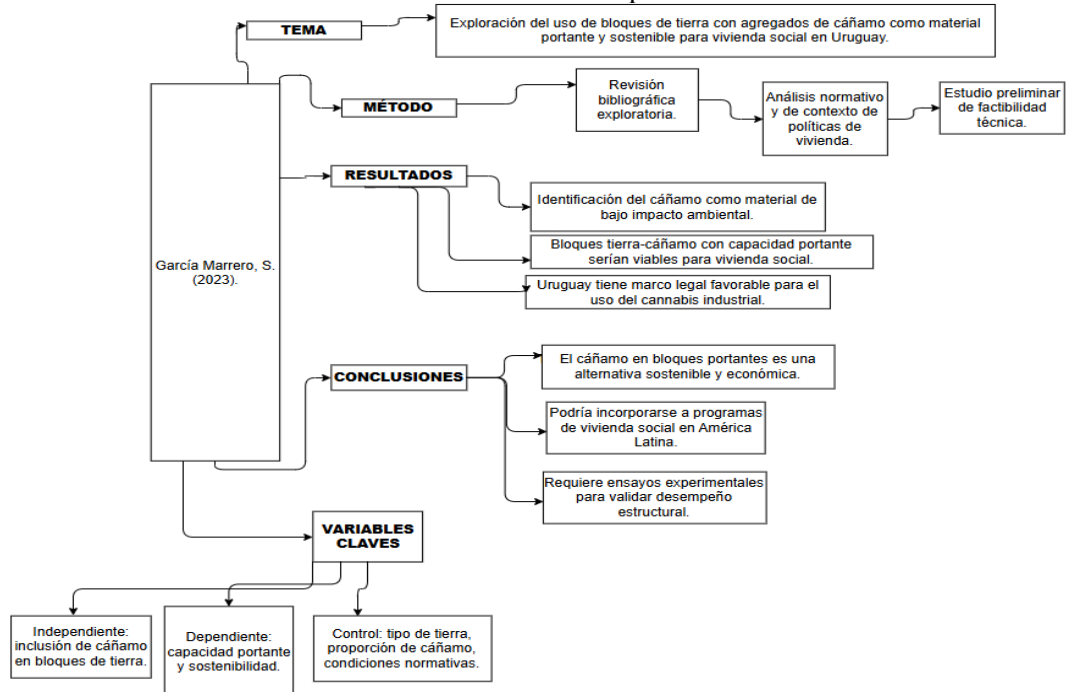


Ilustración 16. Artículo 16 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

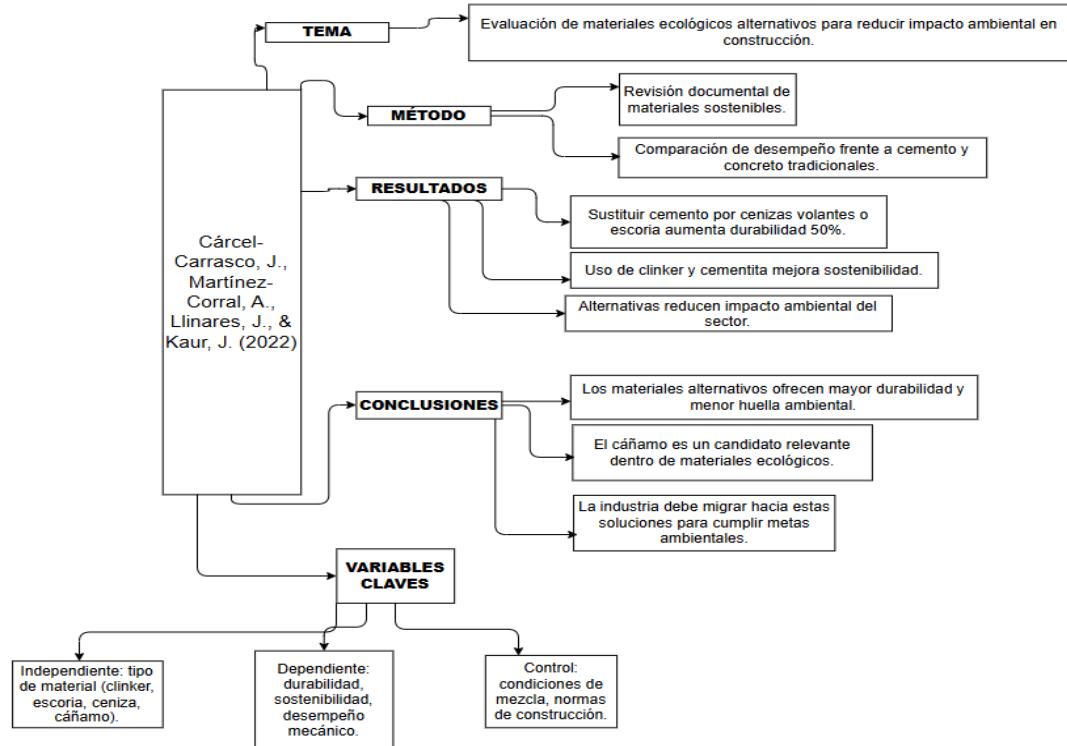


Ilustración 17. Artículo 17 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

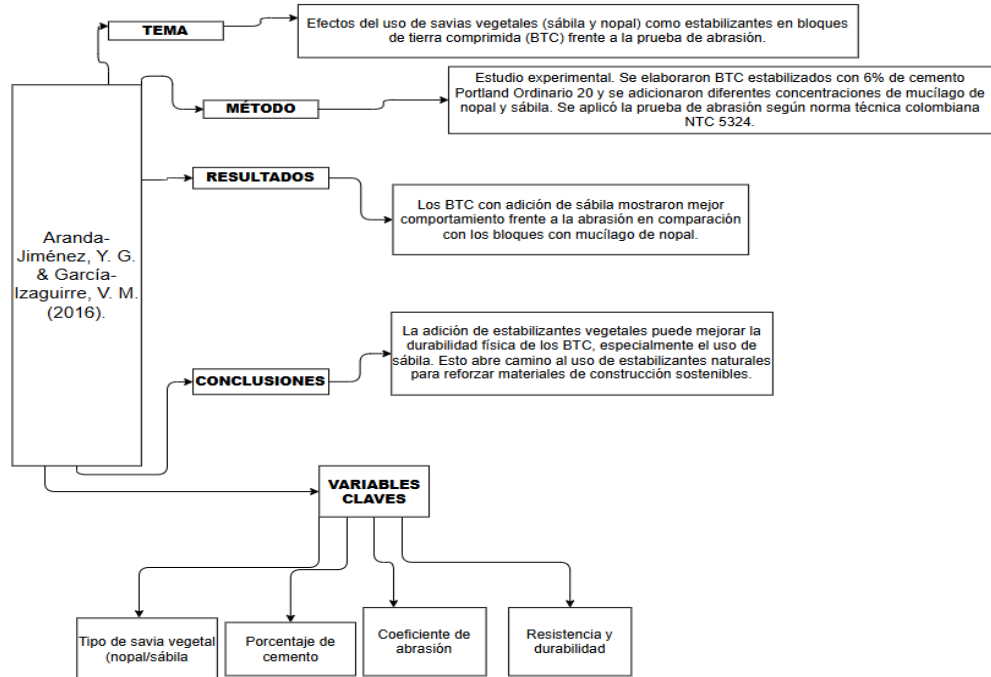


Ilustración 18. Artículo 18 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

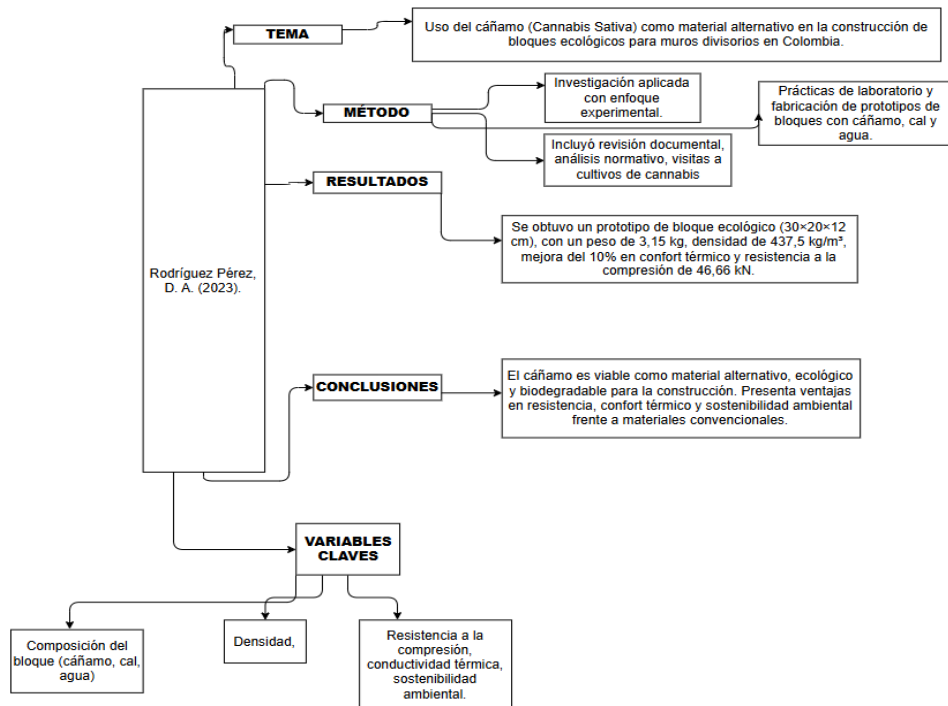


Ilustración 19. Artículo 19 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

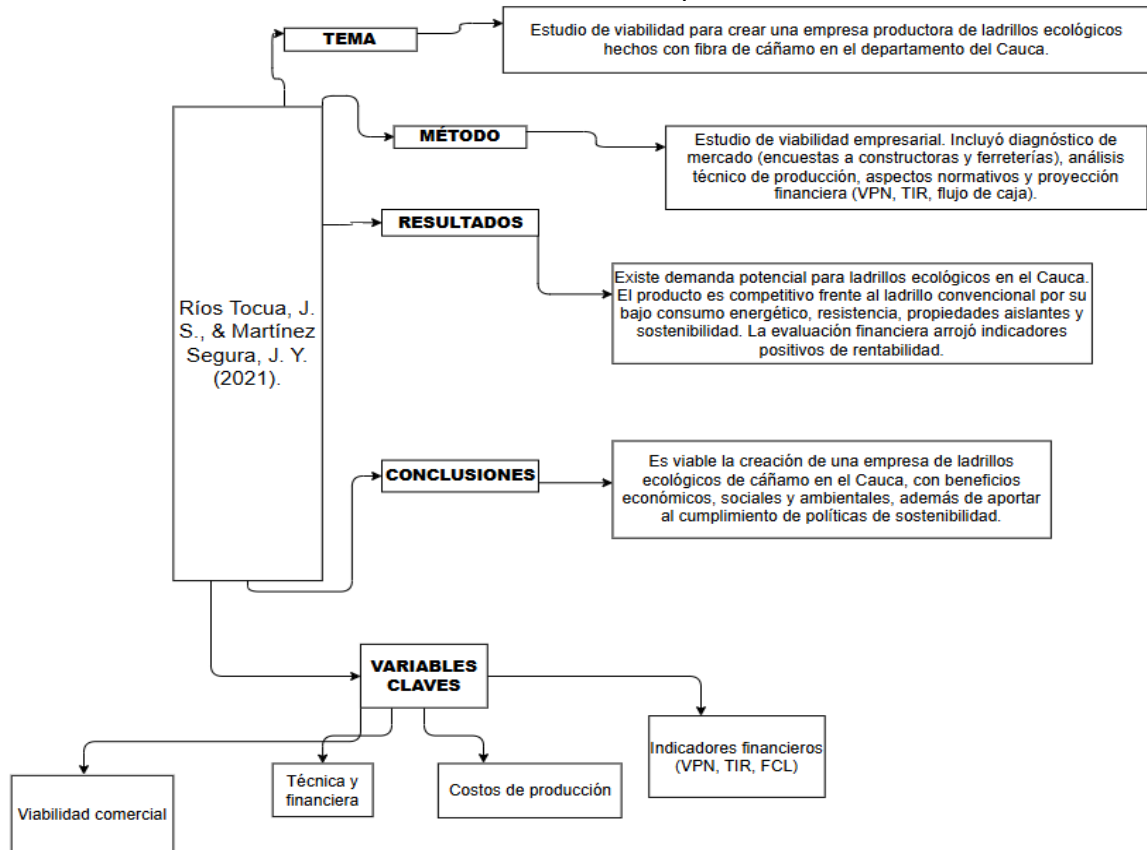


Ilustración 20. Artículo 20 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

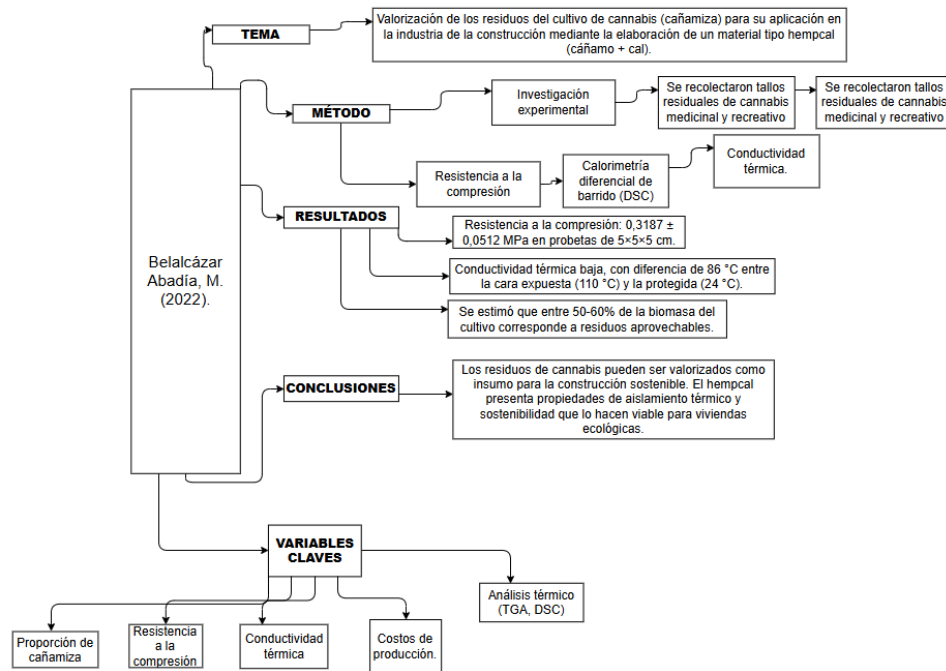


Ilustración 21. Artículo 21 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

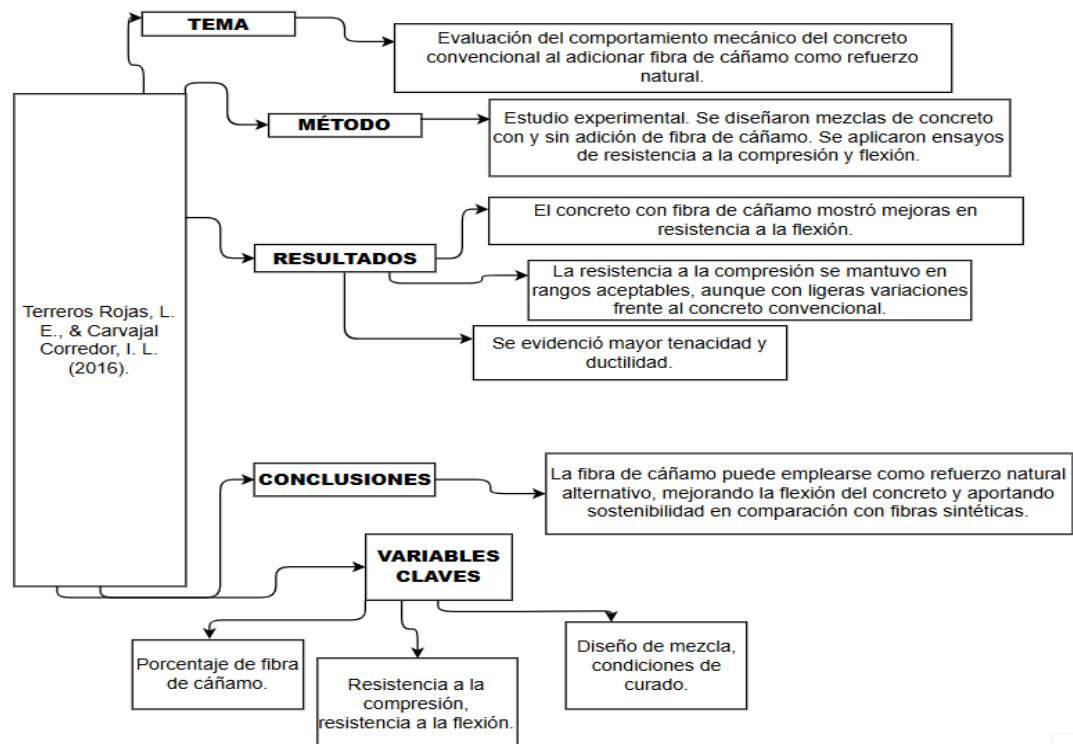


Ilustración 22. Artículo 22 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

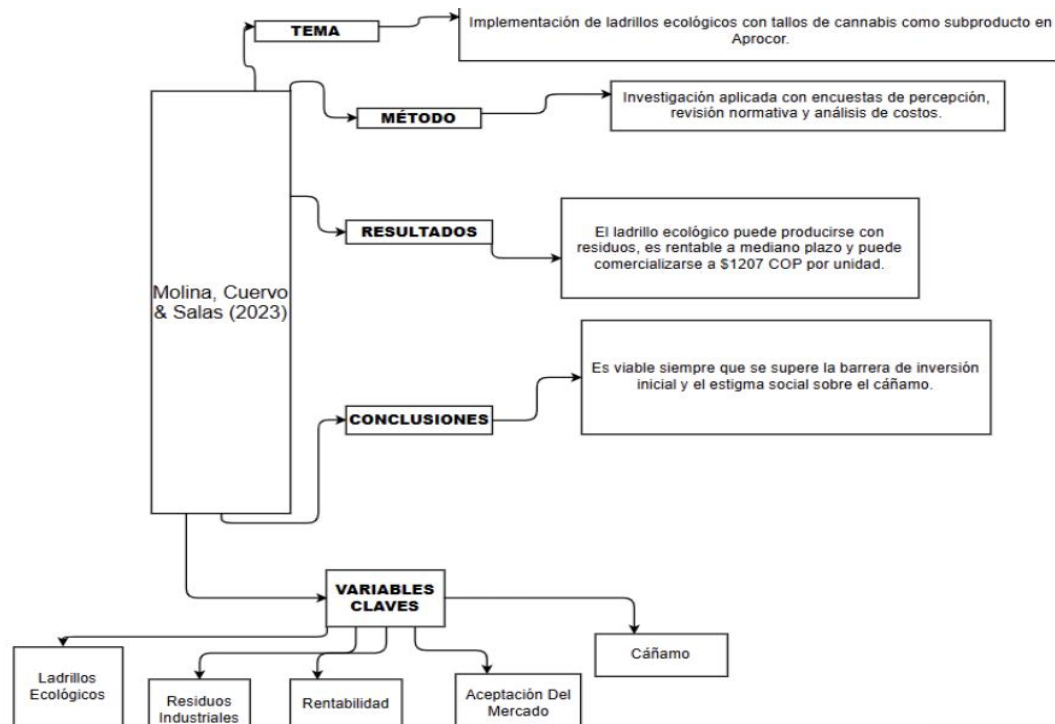


Ilustración 23 Artículo 23 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

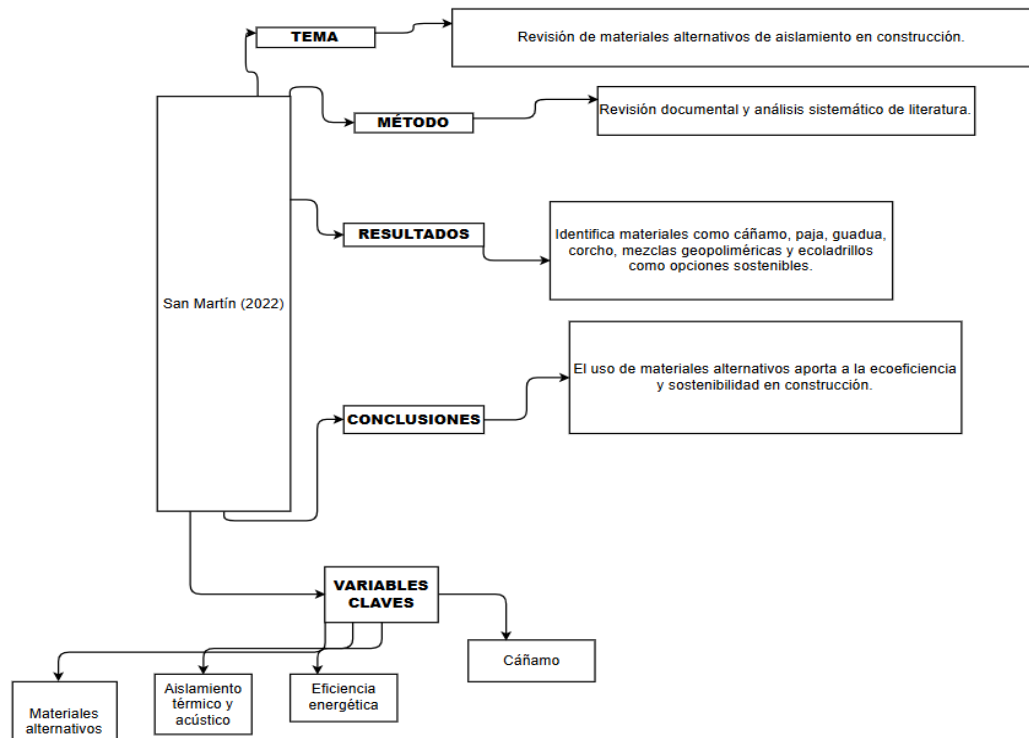


Ilustración 24. Artículo 24 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

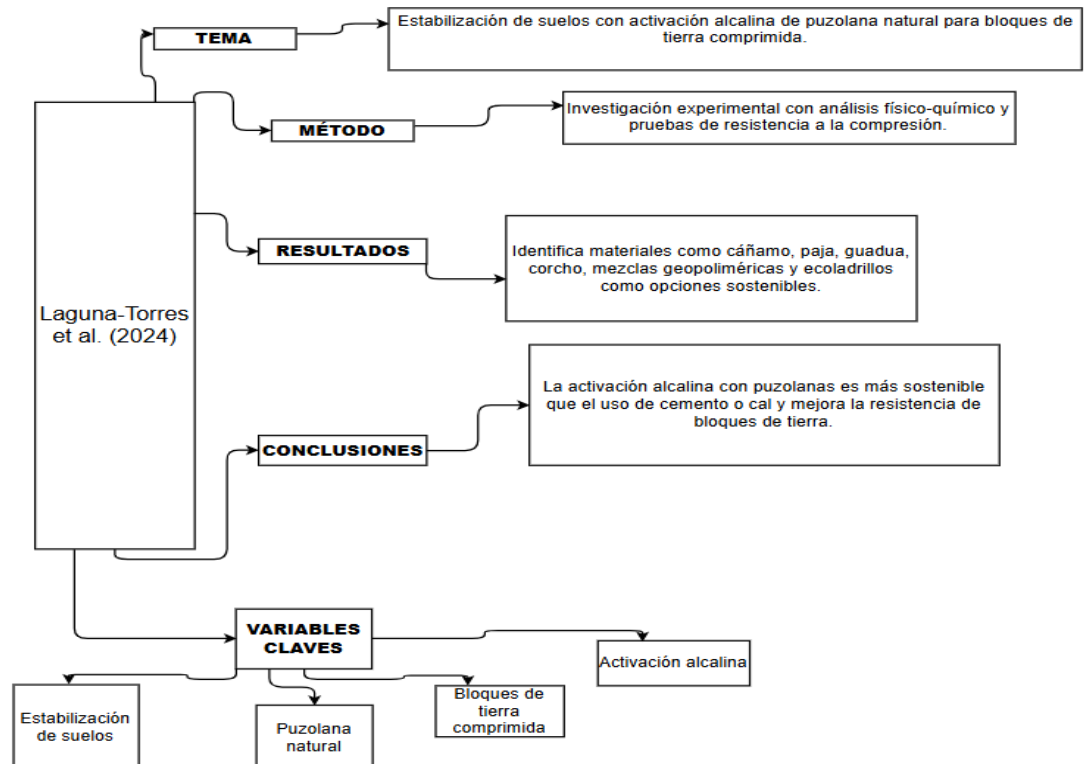


Ilustración 25 Artículo 25 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

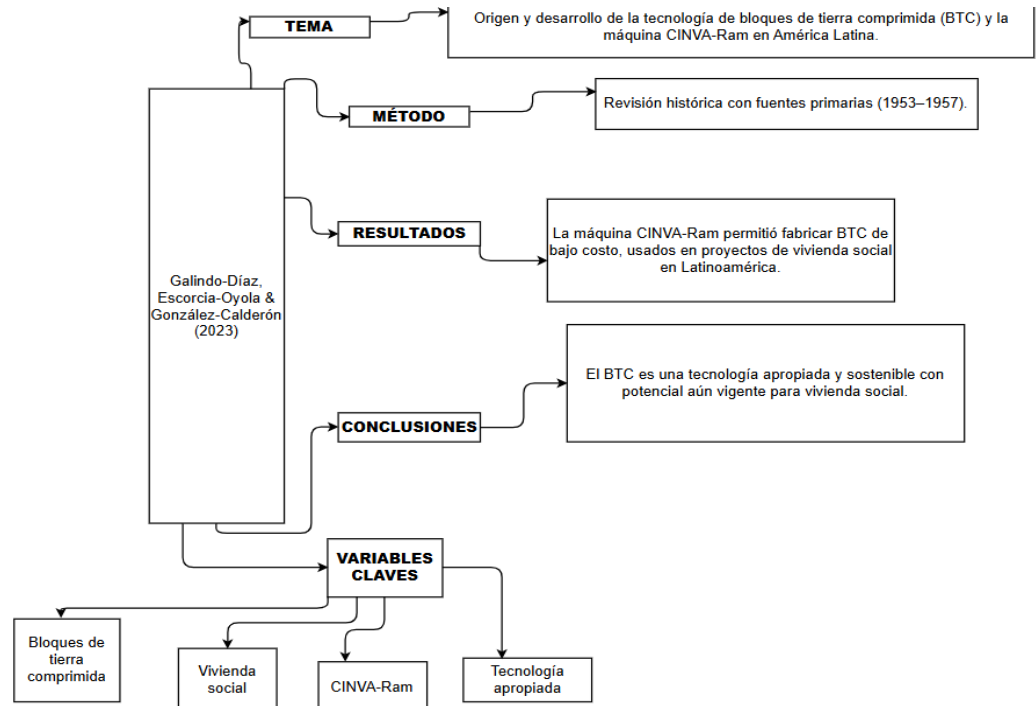


Ilustración 26 Artículo 26 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

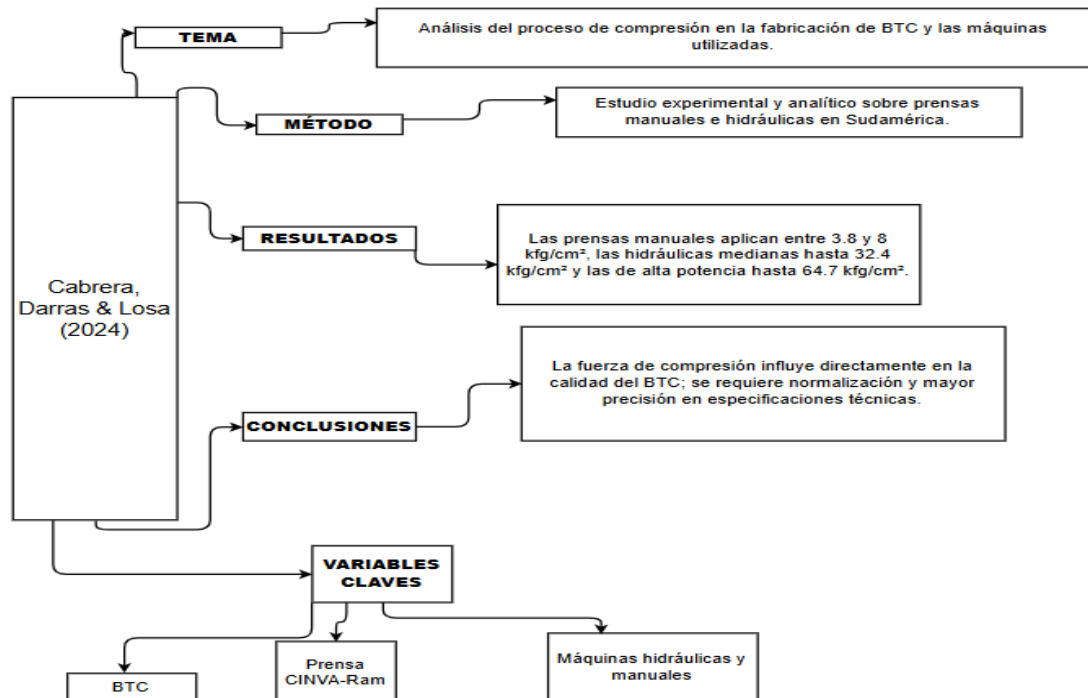


Ilustración 27 Artículo 27 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

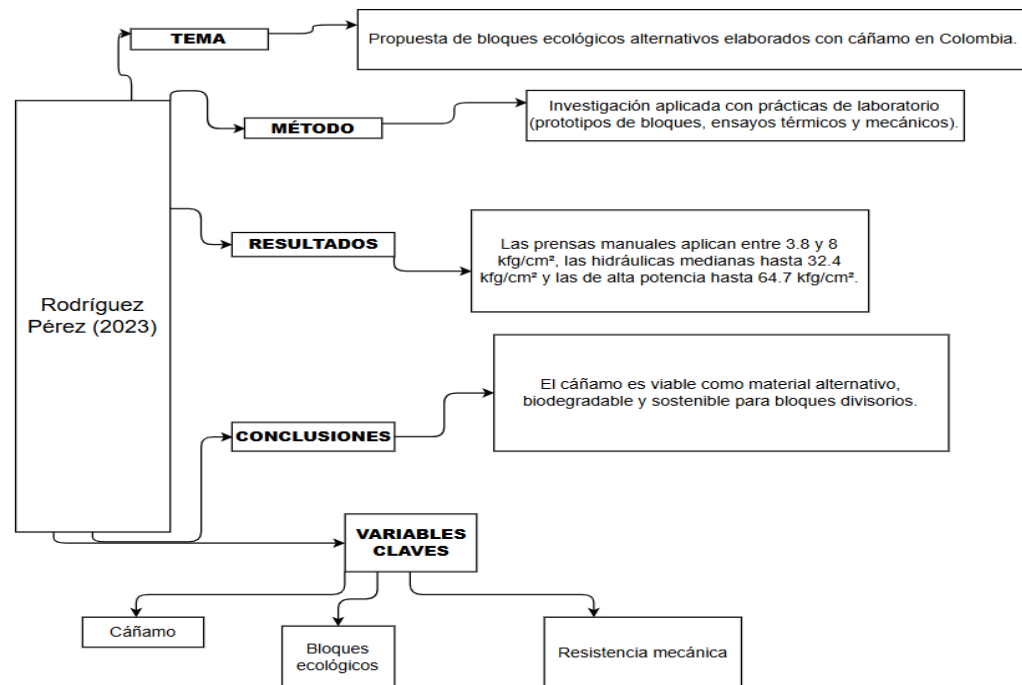


Ilustración 28 Artículo 28 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

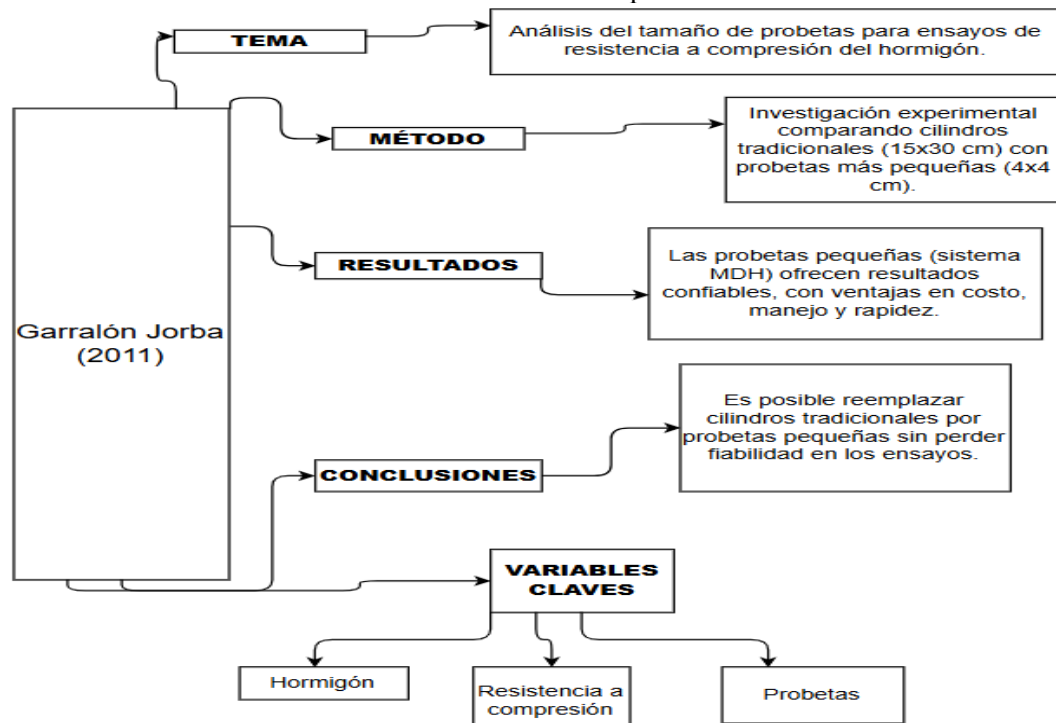


Ilustración 29 Artículo 29 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

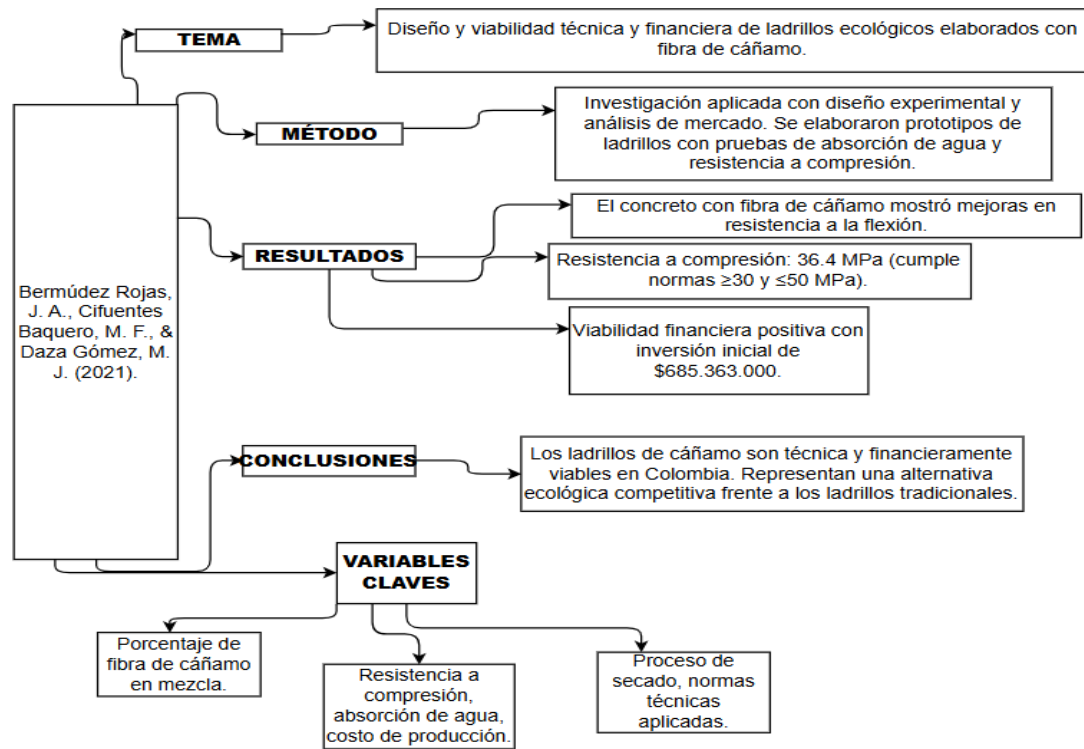


Ilustración 30 Artículo 30 Estado del Arte

Fuente: Autoría Propia

En el campo de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC), estudios como los de Millogo y Laborel-Préneron (Millogo, 2016), donde se demostró que en las fibras naturales como el cáñamo reduce la densidad aparente, como también mejora la capacidad del bloque para que tenga resistencia a los cambios térmicos y absorbe vibraciones acústicas. Con estas características convierten a los BTC con fibras vegetales en una alternativa sostenible, eficiente y adecuada para edificaciones de bajo consumo energético.

En relación comportamiento acústico, investigaciones como las de Walker, Pavía y Mitchell (Walker, 2014) exponen que la incorporación de fibras vegetales en mezclas de tierra o bioconcretos crece la absorción sonora debido a la capacidad de los poros y cavidades internas de disipar la energía de las ondas acústicas. En estructuras compuestas con cáñamo, se han dado a conocer mejoras significativas en la atenuación del ruido aéreo, principalmente

en frecuencias medias, vinculadas al aumento de porosidad y a la reducción de la rigidez del material.

3. Metodología

La metodología aplicada describió de manera detallada los procedimientos experimentales utilizados en la caracterización de los suelos, conforme a las normas del INV y la NTC. Cada ensayo de laboratorio constituyó una herramienta fundamental para identificar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, lo que permitió evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y humedad.

Se realizaron los siguientes ensayos: consistencia y plasticidad (límites líquidos y límite plástico), granulometría por tamizado y por lavado, determinación de la gravedad específica de suelos finos, contenido de humedad natural, compactación Proctor modificado, hidrometría y, finalmente, la elaboración de bloques de tierra comprimida (BTC) como aplicación práctica de los resultados obtenidos en laboratorio.

A continuación, se expone de forma detallada el procedimiento correspondiente a cada ensayo llevado a cabo durante la investigación.

3.1. Consistencia y plasticidad de suelos: límite líquido y límite plástico (INV E-126, NTC 125)

En este ensayo, la consistencia de un suelo se entendió como su resistencia relativa frente a diversas deformaciones y cambios de estado. El límite líquido (LL) correspondió al contenido de humedad en el cual el suelo pasó de un estado plástico a uno líquido, mientras que el límite plástico (LP) fue el contenido de humedad en el que el suelo perdió su plasticidad y se desmoronó al intentar moldearse.



Ilustración 31 Consistencia y plasticidad de suelos: límite líquido y límite plástico
Fuente: Autoría Propia

El procedimiento para la determinación del límite líquido (LL) consistió en preparar una muestra de suelo previamente secada al aire, la cual se tamizó con el tamiz N° 40 y posteriormente se homogeneizó. En cuanto al límite plástico (LP), se tomó una muestra representativa del mismo suelo y se amasó hasta formar rollos de aproximadamente 3 mm de diámetro sobre una superficie lisa.

Tabla 1: Consistencia y plasticidad de suelos: Límite Líquido y Límite Plástico

Función	Descripción
Objetivo	Determinar los límites de consistencia del suelo (Límite Líquido y Límite Plástico) con el fin de evaluar la plasticidad y el comportamiento del suelo en función de su contenido de humedad. Por lo tanto, los parámetros son fundamentales para la clasificación de suelos finos y para predecir propiedades de compresibilidad y estabilidad
Norma	INV E-126 (INVIAS, Colombia) / NTC 125 (ICONTEC). Equivalente a ASTM D4318.

Procedimiento	Límite Líquido (LL): Se colocó una muestra de suelo previamente pasada por el tamiz No. 40 en el dispositivo de Casagrande. Posteriormente, se completó la copa con la muestra y se realizó la ranura utilizando la herramienta estándar. A continuación, se golpeó la copa contra la base, contabilizando el número de golpes necesarios para que las mitades de la ranura se unieran en una longitud de aproximadamente 12 mm. El procedimiento se repitió con diferentes contenidos de humedad. Finalmente, se elaboró una gráfica del número de golpes versus el contenido de humedad, y se determinó el contenido correspondiente a 25 golpes. Límite Plástico (LP): A partir de una porción de la muestra utilizada en la determinación del límite líquido, se procedió a amasar el suelo y formar rollitos de aproximadamente 3 mm de diámetro sobre una superficie lisa o de vidrio. Se continuó con el proceso hasta que los rollitos presentaron grietas y se rompieron.
Resultado	Límite Líquido (LL). Límite Plástico (LP). Índice de Plasticidad ($IP = LL - LP$). Clasificación del suelo según SUCS y AASHTO (arcillas, limos, plasticidad alta o baja). Parámetros que indican la trabajabilidad y comportamiento volumétrico del suelo.

3.2. Granulometría por tamizado (INV E-123, NTC 1522)

El análisis granulométrico por tamizado se realizó con el fin de determinar la distribución de tamaños de las partículas presentes en los suelos granulares. A partir de este ensayo se obtuvo la curva granulométrica, la cual resultó esencial para la clasificación de los suelos, así como para la estimación de su permeabilidad, resistencia y estabilidad en estructuras de ingeniería tales como carreteras, presas y terraplenes. (ASTM International, 2007)



Ilustración 32: Proceso de ensayo de Granulometría

Fuente: Autoría Propia

Granulometría Por Lavado (Tamiz #200) (INV E-124, NTC 1522)

Este ensayo complementó el análisis granulométrico tradicional, ya que permitió determinar la fracción de finos que pasó por el tamiz N. ° 200. Las partículas menores a 0,075 mm correspondieron principalmente a materiales limosos y arcillosos, cuya presencia resultó determinante para evaluar la plasticidad y el comportamiento del suelo en condiciones de humedad. (INVIAS, 2013; ICONTEC, 2018)

Tabla 2: *Datos Granulometría*

Función	Descripción
Objetivo	Determinar la distribución del tamaño de partículas del suelo (fracciones gruesas y finas) mediante el uso de tamices normalizados. Este análisis permite identificar la proporción de grava, arena y finos, información esencial para la clasificación y el diseño de mezclas de suelo.
Norma	INV E-123 (INVIAS, Colombia) / NTC 1522 (ICONTEC). Equivalente a la norma internacional ASTM D422.
Procedimiento	Se secó la muestra de suelo en un horno a una temperatura de 105 ± 5 °C hasta alcanzar una masa constante. Posteriormente, se pesó una cantidad representativa de muestra, comprendida entre 500 g y 2 kg, dependiendo del tamaño máximo de partícula. A continuación, se colocaron los tamices en orden descendente y se depositó la muestra sobre el tamiz superior. El conjunto se agitó de manera mecánica o manual durante un tiempo determinado, con el fin de lograr una adecuada separación de las fracciones del material. Una vez finalizado el proceso de tamizado, se pesó el material retenido en cada tamiz, y con estos datos se calcularon el porcentaje retenido y el porcentaje que pasa en cada uno. Finalmente, se elaboró la curva granulométrica en escala semilogarítmica, representando el porcentaje que pasa en función del diámetro de las partículas, lo que permitió analizar la distribución granulométrica del suelo.
Resultado	Curva granulométrica (% que pasa vs. tamaño de partícula). Distribución de fracciones: grava, arena, limo y arcilla. Clasificación del suelo según SUCS o AASHTO. Parámetros de diseño: coeficiente de uniformidad (Cu), coeficiente de curvatura (Cc). Base para mezclas de suelos en proyectos de ingeniería civil (rellenos, carreteras, concretos, BTC, etc.).

3.3. Gravedad Específica De Suelos Finos (INV E-128-07)

En este ensayo, la gravedad específica (G_s) de los suelos finos se determinó como el parámetro que relacionó el peso unitario de los sólidos del suelo con el del agua a una temperatura estándar. Esta propiedad fue de gran importancia en la mecánica de suelos, ya que permitió calcular índices como la relación de vacíos, la porosidad y el grado de saturación.



Ilustración 33 Gravedad específica de suelos finos
Fuente: Autoría Propia



Ilustración 34. Gravedad específica de suelos finos

Fuente: Autoría Propia

Estos registros permitieron calcular la densidad relativa de los sólidos del suelo. Durante el ensayo se recomienda agitar cuidadosamente el picnómetro y aplicar vacío con el fin de eliminar las burbujas de aire, ya que su presencia pudo alterar las mediciones y afectar la precisión de los resultados, tal como lo establece la normativa colombiana para este procedimiento (INVIAS, 2007).

Tabla 3: *Gravedad específica de suelos finos*

Función	Descripción
Objetivo	Determinar la distribución del tamaño de partículas del suelo (fracciones gruesas y finas) mediante el uso de tamices normalizados. Este análisis permite identificar la proporción de grava, arena y finos, información esencial para la clasificación y el diseño de mezclas de suelo.
Norma	INV E-123 (INVIAS, Colombia) / NTC 1522 (ICONTEC). Equivalente a la norma internacional ASTM D422 (sustituida por ASTM D6913 para fracciones gruesas y ASTM D7928 para finos).
Procedimiento	Se escogió una muestra representativa de suelo seco, con un peso comprendido entre 10 y 20 g, y se colocó en un picnómetro previamente tarado. Posteriormente, se añadió agua destilada y, en caso de ser necesario, se incorporó un agente des aireador con el fin de eliminar las burbujas presentes. El picnómetro se sometió a vacío o a una agitación suave hasta liberar completamente el aire atrapado en la muestra. Finalmente, se llenó el picnómetro con agua destilada hasta la marca de aforo y se registró el peso total para su posterior análisis.
Resultado	Parámetro necesario para cálculos de relaciones de vacíos, peso unitario seco, grado de saturación y consolidación. Dato de entrada para análisis de permeabilidad, resistencia y estabilidad de suelos en proyectos geotécnicos.

3.4. Contenido de humedad natural (INV E-122-13)

El contenido de humedad natural (w) representó la cantidad de agua presente en el suelo en su estado original. Este parámetro resultó de gran importancia, ya que afectó directamente la resistencia, la compresibilidad y la permeabilidad del material, influyendo de manera significativa en su comportamiento bajo cargas y en condiciones de obra.



Ilustración 35. *Contenido de Humedad*
Fuente: Autoría Propia

La metodología consistió en tomar una muestra representativa del suelo y almacenarla en un recipiente hermético para evitar la pérdida de humedad antes del ensayo, tal como lo establece la normativa colombiana para la determinación del contenido de agua natural en suelos. (INVIAS, 2013).

Tabla 4: *Contenido de Humedad.*

Función	Descripción
Objetivo	Evaluar el contenido de humedad natural de un suelo, es decir, la cantidad de agua presente en la muestra en su estado original. Este parámetro es esencial para conocer el comportamiento del suelo en condiciones naturales y para el diseño y control de obras de ingeniería civil.
Norma	INV E-122-13 (INVIAS, Colombia). Equivalente a ASTM D2216
Procedimiento	Se obtuvo la muestra de suelo previamente seca y tamizada, con el propósito de separar las fracciones gruesas correspondientes a partículas mayores al tamiz No. 10 (2 mm), garantizando así una muestra representativa para el desarrollo del ensayo.
Resultado	Contenido de humedad natural del suelo (w%).

La humedad natural corresponde a la relación entre el peso de agua contenida y el peso seco del suelo, donde se expresa en porcentaje. Este parámetro se determina siguiendo los procedimientos establecidos en la norma colombiana para medición del contenido de agua en suelos (INVIAS, 2013).

3.5. Proctor modificado (INV E-142-13)

El ensayo de compactación Proctor modificado tuvo como objetivo establecer la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca máxima alcanzable en condiciones controladas de compactación estandarizada. Este procedimiento permitió determinar la humedad óptima de compactación, parámetro fundamental para evaluar la calidad y el desempeño del suelo en obras de infraestructura como carreteras, presas y cimentaciones (INVIAS, 2013).



Ilustración 36: Ensayo Proctor
Fuente: Autoría Propia



***Ilustración 37** Ensayo Proctor*
Fuente: Autoría Propia

La metodología consistió en tomar una muestra de suelo previamente secada y tamizada, la cual se compactó en un molde cilíndrico en capas de espesor uniforme. Cada capa recibió un número definido de golpes aplicados con un martillo de 4,54 kg que cayó desde una altura de 45,7 cm, conforme a los procedimientos establecidos para el ensayo Proctor modificado (INVIAS, 2013).

Tabla 5: *Ensayo Proctor*

Función	Descripción
Objetivo	Evaluar la relación entre el contenido de agua y la densidad seca de un suelo compactado en laboratorio bajo energía de compactación modificada. Se obtiene la Máxima Densidad Seca (MDS) y el Contenido Óptimo de Humedad (COH). Determinar el contenido de humedad natural de un suelo, es decir, la cantidad de agua presente en la muestra en su estado original.
Norma	INV E-142-13 Instituto Nacional de Vías (Colombia). Equivalente a ASTM D1557 y AASHTO T180.

Procedimiento	Se preparó la muestra de suelo pasándola por el tamiz No. 4 y posteriormente se humedeció progresivamente con diferentes contenidos de agua. A continuación, la muestra se colocó en un molde estándar con un volumen aproximado de 2.124 cm ³ y se compactó en cinco capas, aplicando 25 golpes por capa con un martillo de 4,54 kg y una altura de caída de 457 mm. Luego, se midió la masa húmeda de la muestra y se calculó la densidad húmeda correspondiente. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad en horno. Este procedimiento se repitió para distintos contenidos de humedad y, con los resultados obtenidos, se elaboró la curva de compactación, representando la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad.
Resultado	Curva de compactación (densidad seca vs. humedad). Máxima Densidad Seca (MDS). Contenido Óptimo de Humedad (COH). Sirve para control de compactación, diseño de rellenos y terraplenes, evaluación del comportamiento mecánico del suelo.

Finalmente, el punto máximo de la curva definió la humedad óptima y la densidad seca máxima, parámetros que permitieron establecer los criterios de compactación en campo con el fin de garantizar la estabilidad y la resistencia de las estructuras de tierra. (INVIAS, 2013).

3.6. Hidrometría (NTC 1522)

El ensayo de hidrometría se aplicó para determinar la distribución granulométrica de las partículas finas del suelo, es decir, aquellas con tamaños menores a 0,075 mm que no pudieron evaluarse mediante tamices. Este procedimiento se fundamentó en la ley de Stokes, la cual describe la velocidad de sedimentación de partículas esféricas en un fluido, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la normativa técnica para suelos finos (ICONTEC, 2018).

Tabla 6: Ensayo Hidrometría

Función	Descripción
Objetivo	Determinar la distribución de tamaños de las partículas finas (menores a 0,075 mm o que pasan el tamiz No. 200) en un suelo, midiendo la velocidad de sedimentación de las partículas en una suspensión acuosa.

Norma	NTC 1522 (ICONTEC) Ensayo de Hidrometría para suelos finos. Equivalente a la norma internacional ASTM D7928.
Procedimiento	Se obtuvo la muestra de suelo previamente seca y tamizada, con el fin de separar las fracciones gruesas correspondientes a partículas mayores al tamiz No. 10 (2 mm). Posteriormente, se pesó la cantidad de suelo a ensayar, utilizando aproximadamente 50 g de la fracción que pasa el tamiz No. 10. La muestra se dispersó en una solución de agua con un agente defloculante (hexametáfosfato de sodio) para evitar la aglomeración de partículas. A continuación, la suspensión se colocó en un cilindro de sedimentación de 1 L, se agitó vigorosamente para asegurar una distribución homogénea de las partículas y se inició el cronómetro. Se realizaron lecturas de la densidad de la suspensión a diferentes intervalos de tiempo, que variaron desde segundos hasta 24 horas, utilizando un hidrómetro modelo 152H. Las lecturas obtenidas se corrigieron por temperatura y por efecto del menisco. Finalmente, con los datos registrados, se calcularon los diámetros equivalentes de las partículas en función del tiempo y de la profundidad de medición, aplicando la ley de Stokes para determinar la distribución de tamaño de partículas finas del suelo.
Resultado	Curva granulométrica con el tamizado + hidrometría, donde se muestra el porcentaje que pasa en función del diámetro de partícula. Porcentaje de los suelos arena, limo y arcilla del suelo. Clasificación del suelo de acuerdo con sistemas como el SUCS o AASHTO. Parámetros para análisis de comportamiento: plasticidad, permeabilidad, compresibilidad, expansividad, etc.

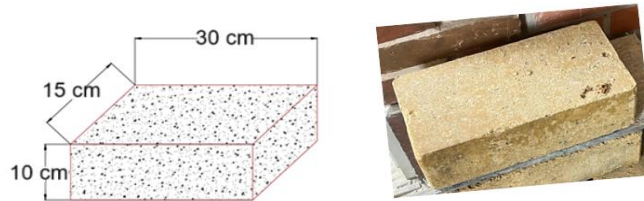
3.7. Dosificación

La dosificación correspondió al proceso mediante el cual se determinaron las proporciones óptimas de los distintos materiales que conformaron una mezcla, con el fin de obtener un producto final con las características deseadas de resistencia, durabilidad y trabajabilidad establecidos para su aplicación. Este procedimiento se realizó siguiendo los lineamientos técnicos definidos en la normativa vigente para el diseño y control de mezclas en construcción. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010).



Ilustración 38: Preparación Dosificación
Fuente: Autoría Propia

En este caso, la dosificación se rigió principalmente por normas y especificaciones técnicas que establecieron criterios para asegurar la calidad de los bloques. Se empleó como referencia la Norma Sismo Resistente NSR-10, así como las Normas Técnicas Colombianas (NTC) aplicables al proceso. Las dimensiones aproximadas de cada bloque se presentan a continuación. Es importante señalar que, durante el proceso de elaboración y la calibración de la máquina CINVA-RAM, se presentaron ligeras variaciones en las medidas. Dichas dimensiones constituyeron la base para realizar la dosificación de cada uno de los BTC fabricados.



	DIMENSIÓN	UNIDAD	DIMENSIÓN	UNIDAD
h	10	cm	0,1	m
b	30	cm	0,3	m
ancho	15	cm	0,15	m
VOLUMEN		cm^3		m^3
BTC	4500		0,0045	
AREA	450	cm^2	0,045	m^2

Ilustración 39. Dimensiones BTC
Fuente: Autoría Propia

3.7.1. DOSIFICACIÓN 5%:

La dosificación con 5 % de cemento se ejecutó con base en una proporción gravimétrica respecto al peso del suelo seco, determinando cantidades específicas de los materiales componentes (arcilla, arena y agua) para obtener una mezcla homogénea adecuada para la fabricación de bloques de tierra comprimida (BTC). Esta proporción buscó asegurar una resistencia mecánica básica, buena trabajabilidad y cohesión en la mezcla, conservando un bajo contenido de cemento con el fin de disminuir tanto el impacto ambiental como el costo.

Se aplicó una cantidad controlada de agua para garantizar la plasticidad adecuada durante el moldeo, sin comprometer la integridad estructural de los bloques. La metodología se fundamentó en el análisis previo de suelos y en criterios empíricos comúnmente utilizados en estudios de BTC, lo que permitió evaluar el desempeño del material con una mínima adición de cemento como estabilizante. (ICONTEC, 2018)

3.7.2. DOSIFICACIÓN 10%:

La dosificación con 10 % de cemento se planteó con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de los bloques de tierra comprimida (BTC), manteniendo la sostenibilidad y evitando un incremento excesivo en los costos. Para este diseño, se partió de un peso base de suelo seco, sobre el cual se determinaron los porcentajes en peso de cada material (cemento, arcilla, arena y agua).

El contenido de agua se ajustó en una cantidad suficiente para garantizar la trabajabilidad durante el moldeo y una compactación adecuada, evitando una retracción excesiva o la

aparición de fisuras. Este ajuste se realizó siguiendo los lineamientos establecidos para el control de humedad en procesos de compactación de suelos (INVIAS, 2013).

Esta metodología, aplicada con y sin adición de cáñamo, posibilitó la comparación del comportamiento físico-mecánico de los BTC con un nivel medio de estabilización (10 % de cemento), lo que permitió evaluar su rendimiento frente a otras dosificaciones en términos de resistencia, absorción y eficiencia constructiva.

3.7.3. DOSIFICACIÓN 15%:

La dosificación con 15 % de cemento se realizó con el fin de obtener bloques de tierra comprimida (BTC) con mayor resistencia mecánica y durabilidad, especialmente frente a condiciones ambientales adversas. A partir de un peso base de suelo seco, se definieron proporciones específicas de los materiales (arcilla, arena, agua y, de manera opcional, cáñamo) en función del porcentaje de cemento establecido.

Tabla 7: *Dosificación de las mezclas y número de muestras ensayadas*

Tipo de Mezcla	Tiempo Curado	Nº Muestras Ensayadas
5% Cemento sin cáñamo	14 días	1
5% Cemento con cáñamo	14 días	1
5% Cemento sin cáñamo	28 días	1
5% Cemento con cáñamo	28 días	1
10% Cemento sin cáñamo	14 días	1
10% Cemento con cáñamo	14 días	1
10% Cemento sin cáñamo	28 días	1
10% Cemento con cáñamo	28 días	1
15% Cemento sin cáñamo	14 días	1
15% Cemento con cáñamo	14 días	1
15% Cemento sin cáñamo	28 días	1

15% Cemento con cáñamo	28 días	1
Total		12

La realización de 12 ensayos en bloques con variaciones en el porcentaje de cemento, con y sin adición de cáñamo, y bajo diferentes tiempos de curado, permitió obtener un muestreo representativo de las condiciones propuestas en la investigación. Debido a que el número de muestras por condición correspondió a una unidad, la comparación directa entre los grupos experimentales posibilitó la identificación de tendencias en las propiedades físicas y mecánicas especialmente en parámetros como la densidad y la resistencia a la compresión (ICONTEC, 2004).

3.8. Elaboración de bloques de tierra comprimida (BTC)

La elaboración de bloques de tierra comprimida (BTC) constituyó una alternativa sostenible y económica en el campo de la construcción. En la producción de estos bloques se aprovechó el suelo local como materia prima, lo que permitió reducir tanto los costos de fabricación y reducir las emisiones asociadas al uso de materiales convencionales, tales como el ladrillo cocido. En concordancia con los lineamientos de construcción sostenible establecidos en la normativa técnica nacional (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).



Ilustración 40.Máquina Bloques de Tierra Comprimida (BTC)
Fuente: Autoría Propia

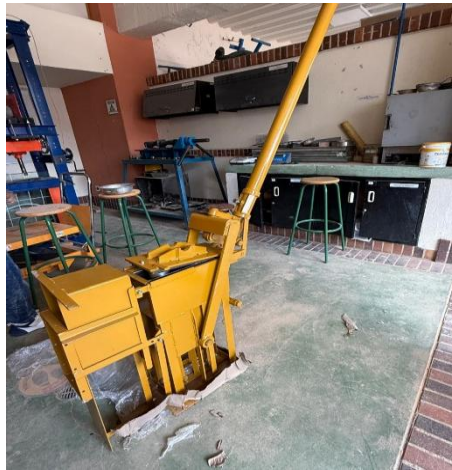


Ilustración 41.Maquinaria para realizar Bloques de Tierra Comprimida (BTC)
Fuente: Autoría Propia

La metodología inició con la selección del suelo, el cual presentó una proporción adecuada de arena, limo y arcilla, garantizando así la plasticidad y la cohesión necesarias para la fabricación de los bloques. En algunos casos, se adicionaron estabilizantes como cemento o cal en proporciones entre el 5 % y el 10 %. Siguiendo los lineamientos técnicos para la estabilización de suelos empleados en procesos constructivos.

Posteriormente, se homogeneizó la mezcla con el contenido de humedad óptimo, previamente determinado mediante el ensayo Proctor. La masa obtenida se colocó en un

molde metálico y se sometió a un proceso de compresión manual o mecánica, hasta alcanzar la densidad requerida. Finalmente, los bloques fueron desmoldados y curados durante 14 y 28 días en condiciones controladas de humedad y sombra, con el fin de evitar la fisuración y garantizar el desarrollo adecuado de la resistencia. Este proceso aseguró que los BTC adquirieran propiedades mecánicas apropiadas para su aplicación en muros de carga y cerramientos. (INVIAS, 2013; Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).



Ilustración 42. Bloques de Tierra Comprimida

Fuente: Autoría Propia

3.9. Ensayo de compresión

Para la realización del ensayo de compresión se utilizó la máquina universal (CINVA-RAM). En primer lugar, se tomaron las medidas de los BTC fabricados con adición de cáñamo y sin ella, correspondientes a dosificaciones del 5 % y del 15 %. Posteriormente, se evaluó su resistencia a los 14 y 28 días de curado, con el propósito de establecer el comportamiento mecánico de cada mezcla.

El procedimiento inició con la verificación y registro de las dimensiones aproximadas de cada bloque, las cuales habían servido como base para la dosificación, considerando que durante la fabricación y la calibración de la máquina podían presentarse ligeras variaciones. A continuación, las muestras fueron identificadas y etiquetadas de acuerdo con la mezcla (dosificación del 5 % y 15 %, con y sin incorporación de cáñamo) y la edad de curado (14 y 28 días).

Seguidamente, se midieron con precisión la longitud, el ancho y la altura de cada BTC, y se registró su peso; con estos datos se calculó el área de la sección transversal, utilizada en el cálculo de la resistencia. Previo al ensayo, se comprobó la planicidad y la condición superficial de las caras de contacto.

Posteriormente, se realizó la calibración y verificación de la máquina universal, siguiendo el procedimiento del laboratorio. Para cada muestra se centralizó la pieza sobre la platina inferior, se ajustó la platina superior y se aplicó la carga a velocidad controlada hasta alcanzar la falla. Durante cada ensayo se registraron la curva carga/deformación, la carga máxima alcanzada y se documentó el modo de rotura observado. Tras la falla, se realizaron las anotaciones correspondientes y, cuando fue pertinente, se tomaron registros fotográficos. (ICONTEC, 2004).



Ilustración 43. Secado Bloques de Tierra Comprimida
Fuente: Autoría Propia



Ilustración 44. Secado Bloques de Tierra Comprimida
Fuente: Autoría Propia



Ilustración 45. Ensayo Compresión Bloques de Tierra Comprimida
Fuente: Autoría Propia



Ilustración 46. Ensayo Compresión Bloques de Tierra Comprimida
Fuente: Autoría Propia

3.10. Propiedades mecánicas

La norma NTC 5324 establece el procedimiento técnico para la determinación de las resistencias mecánicas del concreto, particularmente en los ensayos de compresión y flexión simple. Estas propiedades constituyen parámetros fundamentales en la evaluación de la calidad, desempeño y capacidad estructural de las mezclas de concreto y mortero, siendo indispensables para garantizar la seguridad y durabilidad de las obras de ingeniería civil.

3.11. NTC 5324

La norma NTC 5324 establece el método para determinar la resistencia a la compresión simple en especímenes normalizados, tales como cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, así como en bloques prismáticos con dimensiones normalizadas de altura (h), ancho (b) y largo (l). Estos especímenes deben haber sido curados adecuadamente,

generalmente durante 28 días, para garantizar la homogeneidad y representatividad de los resultados.

Componentes base (por proporción en masa):

- Tierra (funciona como el agregado total, con proporciones adecuadas de arena, limo y arcilla).
- Fibras de cáñamo (empleadas como refuerzo natural para mejorar la resistencia a tracción y reducir fisuración).
- Estabilizante (opcional: cal o cemento, en proporciones de 5–10 % en masa del suelo seco).
- Agua (empleada para compactación de la mezcla, no como agente de hidratación).

Fórmula de mezcla (para 1 m³ de BTC):

$$H\% = \frac{Masa\ agua}{Masa\ seca\ Total} * 100$$

Ecuación 1.

3.12. Variables fórmula de dosificación racional BTC

El parámetro de resistencia a los 28 días de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC), expresado en megapascuales (MPa), corresponde a la resistencia a compresión simple del material tras completar este período de curado. Este valor constituye el indicador principal de la calidad y el desempeño mecánico de los BTC, ya que permite evaluar su capacidad estructural, así como su durabilidad frente a las cargas que enfrentarán durante su vida útil en servicio.

$$R_{28} = k * (\rho_d)^n * \left(1 - \frac{C_f}{C_{m\acute{a}x}}\right)^m * f(H_{\acute{o}pt})$$

Ecuación 2.

Donde:

R_{28} : Resistencia a 28 días del BTC (MPa)

ρ_d : Densidad seca alcanzada del BTC (Kg/m³)

C_f : Contenido de fibra de cáñamo (% en masa o volumen)

$C_{m\acute{a}x}$: Límite de contenido de fibra para no comprometer la resistencia

$H_{\acute{o}pt}$: Humedad óptima de compactación

k, n, m : Constantes empíricas determinadas mediante regresión

El valor de resistencia a los 28 días se emplea como referencia porque constituye el período estándar para evaluar el comportamiento a largo plazo de materiales cementantes y estabilizados, incluido el Bloque de Tierra Comprimida (BTC). Según lo establecido en la normativa colombiana para este tipo de unidades constructivas (ICONTEC, 2016).

Aunque los BTC pueden continuar ganando resistencia después de este lapso, la medición a los 28 días proporciona una base confiable para comparar diferentes mezclas y condiciones de fabricación. En este contexto, la resistencia no depende únicamente de la naturaleza del suelo utilizado, sino también de factores como la densidad seca alcanzada, la adición de fibras, la humedad de compactación y la calidad del proceso constructivo, por ello, la formulación presentada busca integrar el efecto de estas variables en el resultado final de resistencia.

Adicionalmente, la proyección de la resistencia a 28 días a partir de valores obtenidos en edades tempranas, como a los 7 días, puede realizarse mediante modelos de madurez, que permiten estimar la evolución de la resistencia en función del tiempo. De esta forma, la resistencia a compresión a un tiempo dado se relaciona con la resistencia esperada a los 28 días, consolidando un criterio técnico para la predicción del desempeño mecánico de los BTC. (ICONTEC, 2016).

$$f_c(t) = f_{28} * \left(\frac{t}{a + bt} \right)$$

Ecuación 3

Estas constantes empíricas (a, b) se determinan de manera experimental y controlan tanto la rapidez como el ritmo con el que el material desarrolla su resistencia. Este comportamiento es análogo al observado en los modelos aplicados al concreto, como el modelo de Carreño o el propuesto por el American Concrete Institute (ACI), en los cuales se busca describir matemáticamente la evolución de la resistencia en función del tiempo de curado.

Donde:

$f_c(t)$: Resistencia a t días

f_{28} : Resistencia esperada a 28 días

a, b : Constantes empíricas, similares a las del modelo de Carrero o ACI

Esta proyección resulta muy útil en el control de calidad de los bloques de tierra comprimida (BTC), ya que permite anticipar si el material alcanzará la resistencia esperada sin necesidad de esperar los 28 días completos de curado.

Este modelo, común para concreto, puede calibrarse con datos reales de BTC

$$f_{28} = \frac{f_7 * (a + 7b)}{7}$$

Ecuación 4

Luego, se optimizan los tiempos y los recursos en el proceso de fabricación y de ensayo; sin embargo, este modelo requiere ser calibrado con datos específicos de los BTC en estudio, considerando variables como el tipo de suelo, el estabilizante, el contenido de humedad y la presencia de fibras. Todos estos factores influyen directamente en la velocidad de ganancia de resistencia del material.

4. Análisis y resultados

Este análisis incluyó los ensayos de caracterización de suelos, los cuales constituyen un proceso fundamental dentro del campo de la mecánica de suelos, ya que permitieron observar y cuantificar propiedades físicas que incidieron directamente en el comportamiento del material en diferentes aplicaciones de la ingeniería civil.

Entre los ensayos realizados se encuentran la hidrometría y la granulometría, que permiten establecer la distribución de las partículas según su tamaño, así como la proporción de finos presentes en el suelo. De igual manera, se aplicó el ensayo de gravedad específica, el cual relaciona el peso de los sólidos del suelo con el del agua, proporcionando parámetros fundamentales para otros cálculos. Asimismo, se determinaron los límites de Atterberg, que definieron los rangos de humedad en los que los suelos finos cambian su estado de consistencia.

En conjunto, estos ensayos aportaron información clave para la clasificación del suelo y la predicción de su desempeño bajo distintas condiciones de carga. Permitiendo establecer

criterios técnicos para su uso en procesos de estabilización, compactación y diseño de mezclas para Bloques de Tierra Comprimida (BTC).

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

En esta etapa se estudió el suelo empleado como material base para la elaboración de los bloques de tierra comprimida (BTC). A través de ensayos como la granulometría, hidrometría, límites de Atterberg, gravedad específica y Proctor, se determinaron una serie de propiedades fundamentales del material entre ellas la distribución de tamaño de partículas, el comportamiento del suelo frente al contenido de agua, la densidad seca máxima y la humedad óptima de compactación. Estos ensayos permitieron establecer las condiciones mecánicas y físicas del suelo, siguiendo los procedimientos normalizados en Colombia para la caracterización geotécnica (ICONTEC, 2014; ICONTEC, 2015; ICONTEC, 2016).

4.1. Granulometría

La granulometría constituye una de las pruebas fundamentales en el estudio de suelos, ya que permite conocer la distribución de tamaños de las partículas que componen el material. Este análisis incide directamente en propiedades clave como la estabilidad, resistencia, permeabilidad y, especialmente, el comportamiento frente a las cargas (ICONTEC, 1979).

El ensayo consistió en someter una muestra previamente obtenida y seca a un proceso de tamizado a través de una serie de mallas normalizadas, cuya función es separar las partículas de acuerdo con su tamaño. A partir de los resultados se calcularon los porcentajes de material retenido, acumulado y pasante, representados posteriormente en una curva granulométrica, herramienta esencial para la interpretación y clasificación del suelo.

La muestra analizada tuvo un peso total de 125,3 gramos y se procesó con una serie de tamices verificados bajo norma, que abarcaron aberturas desde 12,70 mm hasta 0,075 mm, además de un fondo que recolectó las fracciones más finas. El procedimiento consistió en pesar el material retenido en cada tamiz y calcular los porcentajes correspondientes.

Los datos obtenidos mostraron que en el tamiz de $\frac{1}{2}$ " se retuvo un 10,3% del material, mientras que en el de $\frac{3}{8}$ " el porcentaje fue menor, de apenas 1,52%. En el tamiz #4 (4,75 mm) se registró uno de los valores más altos, con un 13,41%, correspondiente a una fracción significativa de arena gruesa.

En los tamices intermedios, como el #8 y el #16, los porcentajes fueron de 9,26% y 5,67%, lo que refleja una presencia moderada de arena media en el suelo. En los tamices más finos los valores se incrementaron, destacándose el #80 con un 23,38% y el #200 con un 3,11%, lo que elevó el contenido total de finos hasta aproximadamente 27,5% de la muestra.

A continuación, se muestra la siguiente tabla donde se presenta de mejor forma los datos obtenidos.

Tabla 8: *Datos Ensayo Granulometría*

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA					
Abertura del Tamiz(pulg)					
pulg	mm	Peso Retenido(g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje pasante
1/2"	12,70	13,2	10,53	10,53	89,47
3/8"	9,53	1,9	1,52	12,05	87,95
NO 4	4,75	16,8	13,41	25,46	74,54
No.8	2,36	11,6	9,26	34,72	65,28
16"	1,18	7,1	5,67	40,38	59,62
30"	0,60	3,6	2,87	43,26	56,74
40"	0,43	2,1	1,68	44,93	55,07
80"	0,18	29,3	23,38	68,32	31,68
100"	0,15	5,3	4,23	72,55	27,45

200"	0,075	30,5	24,34	96,89	3,11
FONDO	0,00	3,9	3,11	100	0
TOTAL	12,70	125,3	100		

En la tabla presentada, los resultados indican que el suelo analizado contiene fracciones de grava, arena y finos, con un predominio de arenas, aunque acompañado de una presencia considerable de material fino. Al observar la curva granulométrica, se aprecia una pendiente descendente que refleja la disminución progresiva del porcentaje pasante a medida que disminuye el tamaño de abertura de los tamices.

Se verificó que la curva no es uniforme, sino que presenta variaciones en sectores correspondientes a la arena fina y a los finos, lo que evidencia una mala gradación. Esto significa que no existe una distribución homogénea de todos los tamaños de partículas, sino que estas se concentran en fracciones específicas, limitando la compacidad y el buen comportamiento del suelo en mezclas.

A continuación, se presenta la gráfica correspondiente a la curva granulométrica:

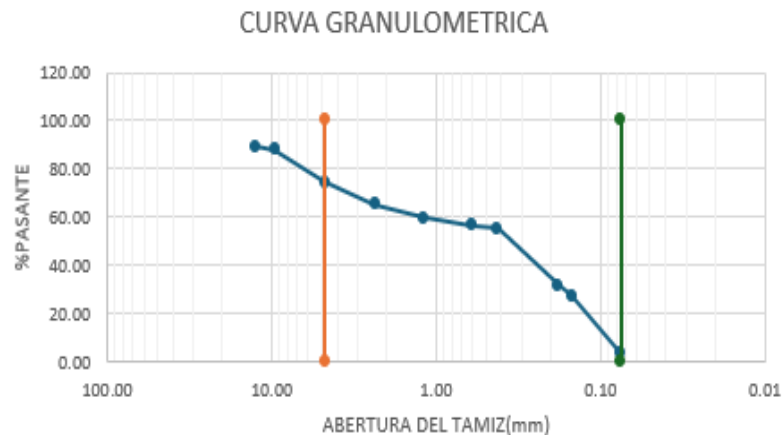


Ilustración 47. _ Curva Granulométrica
Fuente: Autoría Propia

Desde el punto de vista del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el material se clasifica como arena, dado que más del 50 % pasa por el tamiz N.º 4. Sin embargo, el porcentaje que pasa por el tamiz N.º 200 es superior al 12 %, lo que evidencia que los finos tienen una influencia significativa en su comportamiento. En consecuencia, no puede clasificarse como una arena limpia, sino como una arena con finos.

Para diferenciar si corresponde a una arena limosa (SM) o a una arena arcillosa (SC), es necesario complementar la clasificación con los límites de Atterberg. No obstante, los resultados granulométricos obtenidos permiten establecer que se trata de un suelo cuya mecánica está fuertemente condicionada por la fracción fina.

Bajo el sistema AASHTO, debido a que más del 15 % del material pasa por el tamiz N.º 200, el suelo se clasifica en los grupos A-4 a A-7, correspondientes a materiales limosos o arcillosos, considerados de baja calidad para su uso en capas estructurales de pavimentos, dado que presentan alta compresibilidad y limitada capacidad de drenaje.

En cuanto a la curva granulométrica, se observó que en las fracciones más gruesas existe una reducción notoria en el contenido de grava, con un 74 % del material pasando por el tamiz N.º 4. A medida que la curva se desplaza hacia las fracciones de arena, presenta un descenso marcado e irregular, lo que refleja una deficiencia en la uniformidad de la mezcla. Finalmente, en la zona correspondiente a los finos, se registró un incremento significativo del porcentaje pasante, lo que se traduce en una condición crítica: disminución de la capacidad de drenaje, mayor retención de humedad y reducción de la resistencia mecánica del suelo.

4.2. Límite De Atterberg

El presente ensayo tuvo como finalidad determinar el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP) de una muestra de suelo. Estos parámetros constituyen criterios fundamentales tanto para la clasificación del material como para el análisis de su comportamiento según los límites de Atterberg (ICONTEC, 2016).

Para la determinación del límite líquido, se realizaron tres mediciones empleando el aparato de Casagrande, obteniéndose porcentajes de humedad de 38,62 %, 35,26 % y 31,71 %, correspondientes a 16, 24 y 33 golpes, respectivamente, como se ilustra en la siguiente figura.

Tabla 9: Datos Límite Líquido

ITEM	LÍMITE LÍQUIDO		
	15-25	20-30	25-35
Nº			
NUMERO DE GOLPES	16	24	33
CAPSULA Nº	31	202	212
PESO DE LA CAPSULA	11,94	14,7	14,59
W Capsula +suelo Húmedo(g)	34,8	41,39	37,8
W suelo húmedo(g)	22,9	26,72	23,18
W capsula + suelo seco(g)	28,4	34,453	32,19
W suelo seco(g)	16,50	19,7	17,59
W del agua(g)	6,37	6,93	5,581
% de humedad	38,62	35,26	31,71
PROMEDIO			
CANT DE HUMEDAD%			

Los valores obtenidos se representaron gráficamente, mostrando una tendencia descendente, en la cual se evidencia que, a mayor número de golpes, menor es el contenido de humedad requerido para el cierre de la ranura en la muestra.

A partir de la curva de fluidez, mediante el proceso de interpolación, se determinó el contenido de humedad correspondiente a 25 golpes, resultando en un valor de 35,26 %, el cual se establece como el Límite Líquido (LL) del suelo analizado.

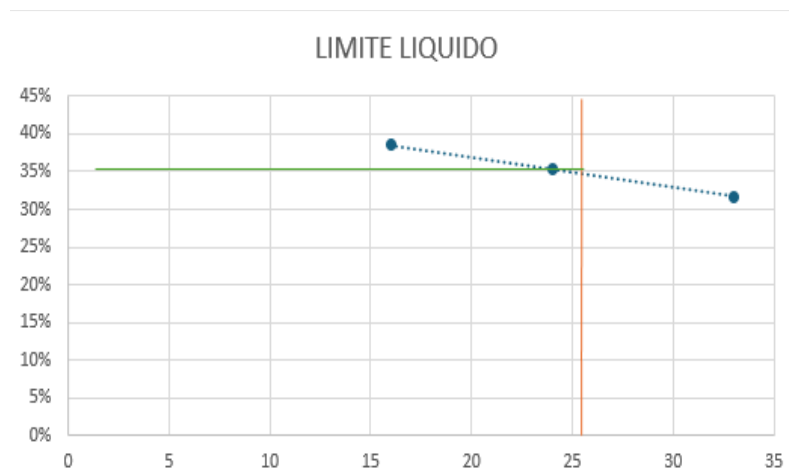


Ilustración 48. *Ensayo Límite Líquido.*
Fuente: Autoría Propia

En la gráfica anterior se observa el Límite Líquido (LL), donde se refleja claramente la relación entre el número de golpes y el contenido de humedad. La línea de tendencia obtenida facilita la interpolación, permitiendo ubicar de manera precisa el valor de los 25 golpes, representado con una línea vertical roja, mientras que la línea horizontal verde señala el contenido de humedad correspondiente (35,26 %), lo cual facilita la lectura e interpretación del resultado.

Por su parte, en la determinación del Límite Plástico (LP), la muestra de suelo fue preparada y se moldearon hilos cilíndricos de aproximadamente 3 mm de diámetro, hasta que comenzaron a presentar agrietamiento. El contenido de humedad registrado en este punto corresponde al valor del Límite Plástico.

Tabla 10: Datos Límite Plástico

ITEM	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	Nº	15-25	20-30	25-35	
NUMERO DE GOLPES		16	24	33	
CAPSULA Nº		31	202	212	
PESO DE LA CAPSULA		11,94	14,7	14,59	
W Capsula +suelo Húmedo(g)		34,8	41,39	37,8	
W suelo húmedo(g)		22,9	26,72	23,18	
W capsula + suelo seco(g)		28,4	34,453	32,19	
W suelo seco(g)		16,50	19,7	17,59	
W del agua(g)		6,37	6,93	5,581	
% de humedad		38,62	35,26	31,71	
PROMEDIO CANT DE HUMEDAD%					21,57

En la determinación del Límite Plástico (LP), las humedades obtenidas fueron 22,38 % y 20,77 %, cuyo promedio resultó en un valor de 21,57 %, tal como se muestra en la tabla anterior.

Posteriormente, se calculó el Índice de Plasticidad (IP) mediante la diferencia entre el Límite Líquido (LL = 35,26 %) y el Límite Plástico (LP = 21,57 %). La operación se expresa de la siguiente manera:

$$IP = LL - LP$$

Ecuación 5

$$IP = 35,26\% - 21,57\%$$

Ecuación 6

$$IP = 13,69\%$$

Este valor del Índice de Plasticidad refleja que el suelo presenta una plasticidad intermedia, lo que implica que puede experimentar deformaciones considerables bajo cambios de humedad, pero sin llegar a comportarse como una arcilla de alta plasticidad.

De acuerdo, con el Sistema Unificad de Clasificación de Suelos (SUCS), indico un material de plasticidad media, donde se caracterizó con unas arcillas limosas o arcillas de baja a media plasticidad.

4.3. Gravedad Específica

En el ensayo de gravedad específica realizado en laboratorio mediante el método del picnómetro, se determinó la relación entre la masa de los suelos y el volumen ocupado, considerando que el agua destilada se mantuvo a temperatura constante durante el procedimiento (ICONTEC, 2014).

Este parámetro resulta fundamental, ya que interviene directamente en el cálculo de propiedades físicas del suelo, como el índice de vacíos, el grado de saturación y la porosidad,

las cuales permiten interpretar su comportamiento frente a procesos de asentamiento, permeabilidad y compactación. (ICONTEC, 2014).

Para la ejecución del ensayo se emplearon cuatro picnómetros, en los cuales se realizaron pesajes y registros de manera sistemática. Se obtuvieron los valores correspondientes al peso del frasco con agua, el peso del frasco con agua y suelo, y el peso del suelo seco.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 11: *Datos Ensayo Gravedad Específica (picnómetro)*

	PICNÓMETRO 1	PICNÓMETRO 2	PICNÓMETRO 3	PICNÓMETRO 4
W PIC+AGUA	698,7	697,7	696,6	695,8
T°	17,9	28,8	36,1	38,4
W PIC+GUA+M UESTRA(g)	760	760	760	760
T°	28,8	28,8	28,8	28,8
W suelo seco(g)	99,1	99,1	99,1	99,1
W PLATÓN	186,7	186,7	186,7	186,7
Gs	2,62	2,69	2,775	2,84
PROMEDIO	2,73			

En todos los ensayos se mantuvo constante la cantidad de muestra, con un valor de 99,1 g, lo que garantizó la homogeneidad del procedimiento. El peso del picnómetro con agua osciló entre 695,8 g y 698,7 g, presentando una mínima variación atribuida a la temperatura del agua y al nivel de llenado. Por su parte, el peso del picnómetro con agua y suelo se mantuvo constante en 760 g, lo que confirmó la repetitividad y estabilidad del procedimiento.

Se registró la temperatura del agua en cada medición, encontrándose valores entre 17,9 °C y 38,4 °C. Esta variación resultó fundamental, ya que afecta directamente la densidad del agua, la cual disminuye a medida que aumenta la temperatura: desde aproximadamente 0,9986 g/mL a 18 °C hasta 0,9935 g/mL a 38 °C.

Aunque las diferencias puedan parecer pequeñas, influyen de manera directa en el cálculo de la gravedad específica del suelo, debido a que esta depende de la relación entre el volumen de agua desplazado y el volumen de los sólidos. Para corregir este efecto se recurrió a la tabla de densidades del agua y a los coeficientes de temperatura, aplicando el factor de corrección (α_t) y normalizando los resultados a una condición común.

A partir de las mediciones realizadas y aplicando la fórmula correspondiente a la ecuación 7, se obtuvieron los siguientes valores de gravedad específica: 2,62 para el picnómetro 1, 2,69 para el picnómetro 2, 2,77 para el picnómetro 3 y 2,83 para el picnómetro 4. El valor promedio calculado fue de 2,73, el cual se encuentra dentro del rango típico de los suelos minerales (2,60 – 2,80).

Estos resultados permiten confirmar que el suelo analizado corresponde a un material mineral inorgánico típico, con propiedades adecuadas para los ensayos de compactación y la elaboración de bloques de tierra comprimida (BTC) desarrollados en fases posteriores del estudio.

$$G_s = \left(\frac{W_{suelo}}{W_{fiola+agua} + W_{suelo} - W_{fiola+suelo+agua}} \right) * \alpha_t$$

Ecuación 7

Los resultados obtenidos indican que el material analizado corresponde a un suelo de origen inorgánico, con predominio de minerales como cuarzo, feldespatos y silicatos, los cuales presentan valores de gravedad específica cercanos a 2,65. La ausencia de valores muy bajos ($<2,55$) descarta la presencia significativa de materia orgánica, mientras que la ausencia de valores elevados ($>2,85$) permite descartar la existencia de minerales pesados.

Si bien se evidenció cierta variación entre los resultados de los cuatro picnómetros, la dispersión se considera normal en este tipo de ensayo. La diferencia entre el valor mínimo (2,62) y el máximo (2,83) fue de 0,21, lo que equivale a una variación aproximada del 7,5 %. Estas diferencias pueden explicarse por errores experimentales menores, como la presencia de burbujas de aire, limpieza no homogénea de los frascos, imprecisiones en el llenado con agua destilada o en el secado del suelo, además de variaciones de temperatura que requieren correcciones en los cálculos. Aun así, el valor promedio de $G_s = 2,73$ se considera representativo y confiable.

Este valor de gravedad específica resulta fundamental para el cálculo de parámetros como índice de vacíos y porosidad, que permiten conocer la proporción de espacios vacíos respecto a los sólidos, afectando directamente la compresibilidad, permeabilidad y comportamiento mecánico del suelo. Asimismo, constituye un dato clave en los ensayos de compactación (Proctor modificado), al relacionar la densidad seca máxima con el peso específico de los sólidos, y en la determinación de las condiciones óptimas de humedad y densidad que garantizan la estabilidad de las estructuras en campo. (ICONTEC, 2014).

En conclusión, el suelo evaluado presenta características minerales típicas, sin componentes que alteren de manera significativa su comportamiento. Esto lo hace apto para procesos de compactación y para soportar cargas estructurales, siempre que cumpla con otros criterios geotécnicos complementarios. El ensayo de picnómetro permitió obtener un valor confiable de 2,73, validando que el material es representativo y que la variación entre picnómetros responde a factores experimentales menores, sin comprometer la precisión ni la aplicabilidad del resultado final.

4.4. Hidrometría INV E-124

El ensayo de hidrometría se realizó para analizar las partículas finas, ya que permitió determinar la distribución de tamaños de aquellas fracciones que, a simple vista, no podían evaluarse mediante el tamizado tradicional. La importancia de este método radicó en la ley de Stokes, la cual estableció que la velocidad de sedimentación de una partícula era proporcional al cuadrado de su diámetro, siempre que las condiciones del fluido, su forma y la densidad se mantuvieran estables.

Se registraron los datos iniciales para el desarrollo de este ensayo.

Tabla 12: Datos ensayo Hidrometría.

DATOS:	
AGENTE DISPERSANTE	Sln (NaPo3)
TIPO DE HIDRÓMETRO	152H
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2,73
MASA DEL SUELO	99,1
CORRECCIÓN POR DEFLOCULANTE	5
CÁLCULO a	0,983

A partir de esta ley se admitió que las partículas en suspensión dentro de un medio líquido tendían a sedimentar con una velocidad determinada, la cual podía medirse de manera indirecta mediante la lectura de un hidrómetro. Este instrumento registraba la densidad aparente de la suspensión en función del tiempo. Se consideró que, a mayor tamaño de partícula, más efectiva resultaba su sedimentación, mientras que las partículas más finas requerían un tiempo mayor para alcanzar la misma condición. (INV, 2013).

El procedimiento llevado a cabo en el laboratorio inició con la preparación de la muestra de suelo previamente seca y pasada por el tamiz #20, con el fin de asegurar que el material ensayado estuviera compuesto únicamente por la fracción final. Posteriormente, el material se dispersó en agua mediante la adición de un agente defloculante, cuya función fue evitar la aglomeración de partículas y garantizar que el proceso de sedimentación se desarrollara de manera individual y no conjunto de partículas. (INV, 2013).

La muestra se agitó enérgicamente para homogenizar la suspensión y luego se vertió en una probeta de un litro, donde se realizaron las mediciones con el hidrómetro en intervalos de tiempo específicos. Adicionalmente, se controló la temperatura del agua, ya que la viscosidad del fluido dependía directamente de este parámetro y podía influir en la velocidad de sedimentación de las partículas.

Las lecturas obtenidas en los distintos intervalos de tiempo representaron valores de densidad de la suspensión, los cuales se relacionaron con la concentración de partículas que permanecían en suspensión. Para convertir estos datos en valores reales de distribución granulométrica, fue necesario aplicar correcciones. Una de ellas correspondió al menisco, ya que el hidrómetro se leyó en el punto inferior de la curva del líquido, con el fin de evitar errores generados por la tensión superficial.

Asimismo, se aplicó la corrección de temperatura, ajustando los resultados con base en la viscosidad real del agua al momento del ensayo. Finalmente, se incluyó la corrección del defloculante, debido a que su peso se restó en el cálculo para evitar una sobreestimación de la masa del suelo en suspensión.

Una vez ajustados, los datos se transformaron en profundidades equivalentes y diámetros de partícula, aplicando las fórmulas derivadas de la Ley de Stokes. Con base en ello, se determinó el porcentaje de material que pasó por cada fracción.

Tabla 13: *Tabla De Cálculos Ensayo Hidrometría*

TIEMPO(MIN)	TEM(°C)	LECTURA REAL HIDROMET	RCN	PROFUNDIDAD EFFECTIVA mm	CONSTANTE	DIAMETRO (mm)	CORRECCIÓN DE TEMPERATURA	R CORREGIDA	%PASANTE
0,5	18°	53	54	74	0,01378	0,168	-0,500	48,500	48,09
1	18°	49	50	81	0,01378	0,124	-0,500	44,500	44,12
2	18°	47	48	84	0,01378	0,089	-0,500	42,500	38,17
4	18°	43	44	91	0,01378	0,066	-0,500	38,500	38,17
8	18°	40	41	96	0,01378	0,048	-0,500	35,500	35,20
15	18°	38	39	99	0,01378	0,035	-0,500	33,500	33,21
30	17,9°	35	36	104	0,01378	0,026	-0,500	30,500	30,24
60	17,8°	33	34	107	0,01378	0,018	-0,500	28,500	28,26
120	17,5°	29	30	114	0,01378	0,013	-0,500	24,500	24,29
240	18°	25	26	120	0,01378	0,010	-0,500	20,500	20,33
480	17,5°	22	23	125	0,01378	0,007	-0,500	17,500	17,35

960	17,1°	20	21	129	0,01396	0,005	-0,800	15,200	15,07
-----	-------	----	----	-----	---------	-------	--------	--------	-------

Los resultados obtenidos en la tabla anterior mostraron que, con el paso del tiempo, la concentración de partículas en suspensión disminuyó progresivamente, debido a que el diámetro de estas se estabilizó en el medio líquido. En los primeros minutos sedimentaron las partículas más gruesas, correspondientes al limo grueso, lo que permitió que en la suspensión permanecieran únicamente las fracciones más finas.

El hidrómetro registró menores concentraciones de partículas suspendidas, evidenciando que solo permanecieron en el medio acuoso las fracciones más finas, correspondientes a los limos muy finos y a las arcillas. A partir del análisis de los valores obtenidos se determinó que la muestra estuvo conformada por un porcentaje elevado de partículas menores a 0,002 mm, lo cual evidenció la presencia significativa de arcillas en el suelo analizado.

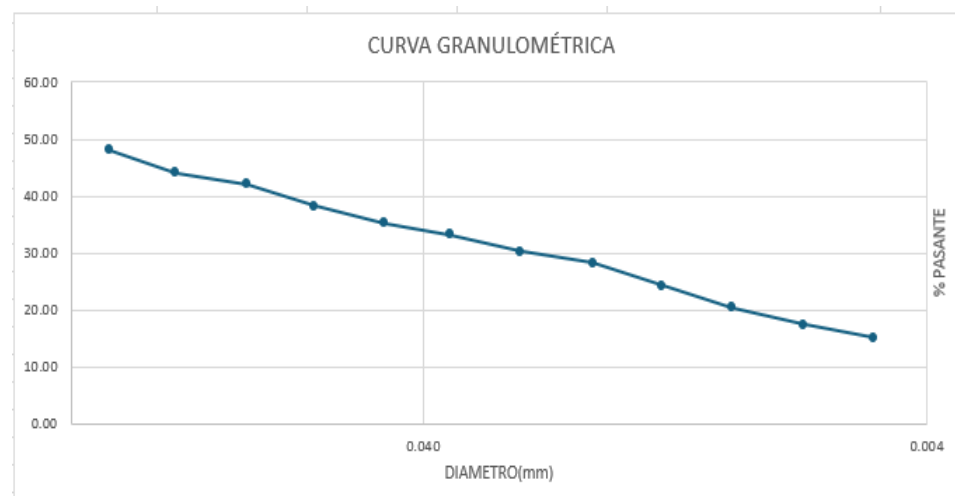


Ilustración 49. *Gráfica Ensayo Hidrometría*
Fuente: Autoría Propia

Con base en la gráfica anterior, se representaron los resultados mediante una curva granulométrica que permitió visualizar la distribución de tamaños en toda la fracción

analizada. En este caso, la curva mostró una concentración hacia los diámetros pequeños, lo que evidenció la predominancia de partículas finas.

La transición entre las arcillas y los limos no fue abrupta, sino progresiva, aunque se observó un sesgo hacia el dominio de las arcillas. Posteriormente, al comparar con las curvas típicas, se identificó que el suelo no correspondía a un material bien graduado, debido a que no presentó una distribución uniforme de tamaños, sino que se concentró en una fracción específica.

A partir de los datos obtenidos, se procedió a verificar la clasificación del suelo. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), cuando un suelo presenta más del 50 % de material pasante por el tamiz #200, se clasifica como un suelo fino. En este caso, los resultados confirmaron ampliamente dicha condición.

4.5. Diseño de mezcla.

En función de la caracterización, se especificaron las proporciones de suelo, cemento y cáñamo que se ensayaron. El ensayo Proctor fue importante, ya que indicó la cantidad de agua y la densidad de compactación óptima.

Se establecieron mezclas con 5%, 10% y 15% de cemento, con y sin cáñamo. Esta etapa conectó el análisis de laboratorio con la fase práctica, y los datos del suelo se transformaron en mezclas que posteriormente fueron probadas.

4.6. Ensayo de Proctor Estándar INV E-142-13

4.6.1. Proctor 5%

El ensayo Proctor se realizó con una mezcla de suelo y un aditivo del 5% (agua y cemento). Este tuvo como objetivo resolver la relación entre factores como la densidad seca del suelo y el contenido de humedad, identificándose la humedad óptima en la que se alcanzó la máxima densidad seca. Se utilizaron cuatro muestras con diferentes porcentajes de humedad, como se muestra en Tabla 15. Los valores obtenidos de densidad/humedad variaron entre 1,91 g/cm³ y 2,05 g/cm³, lo que mostró que el suelo correspondió a diferentes contenidos de humedad durante la compactación.

Tabla 14: Datos Ensayo Proctor 5%

MUESTRA	WMH+MOLDE(g)	WMH(g)	DENSIDAD MH(g/CM3)	HUMEDAD %	CANTIDAD AGUA A APLICAR(g)
1	3789	1800,5	1,91	5%	150
2	3922,3	1933,8	2,05	8%	176
3	3791,5	1803	1,91	13%	286
4	3790,4	1801,9	1,91	15%	330

Tabla 15: Corrección de Humedad 5%

W Platón	W m +Platón	Wmh	W mseca +Platón	Wmseca	w(%)	Yd
52,8	355	302,2	339,6	286,8	5,37%	1,81
80,8	662,7	581,9	617	536,2	8,52%	1,89
65,3	544,5	479,2	488,1	422,8	13,34%	1,68
65,6	853,7	788,1	759,5	693,9	13,58%	1,68

Con base en estos datos, se calcularon las densidades secas corregidas para la humedad, y se evidenció un comportamiento típico en este tipo de ensayo. Se presentó un incremento inicial de la densidad seca con el aumento de la humedad, hasta alcanzar un valor máximo, seguido de una disminución al superar la humedad óptima. El valor de la máxima densidad fue de $1,96 \text{ g/cm}^3$, correspondiente a una humedad del 7,4%, lo cual indicó el punto de humedad óptima para compactar este suelo con un 5% de aditivo.

En este proceso se determinó el punto en el que las partículas del suelo se ajustaron de la mejor manera, considerando la cantidad de agua suficiente para que actuara como lubricante, sin comprometer el punto de saturación. Al evaluar el proceso, se evidenció que, al llegar a un exceso de agua, las partículas comenzaron a desplazarse, lo que disminuyó la eficiencia de la compactación. Esto ayudó a garantizar una compactación adecuada del suelo en función de la humedad, con el fin de asegurar estabilidad y durabilidad en las estructuras.

Por lo tanto, gracias a los valores obtenidos, se evaluó la gráfica en la que se evidenció claramente la curva típica, identificándose el punto máximo que indicó la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptima.

Este análisis permitió concluir que el suelo, bajo diferentes condiciones, presentó un excelente comportamiento de compactación y resultó óptimo para aplicaciones en infraestructura, siempre y cuando se consideraran las condiciones y valores obtenidos. A continuación, se muestra la gráfica correspondiente a los datos experimentales.

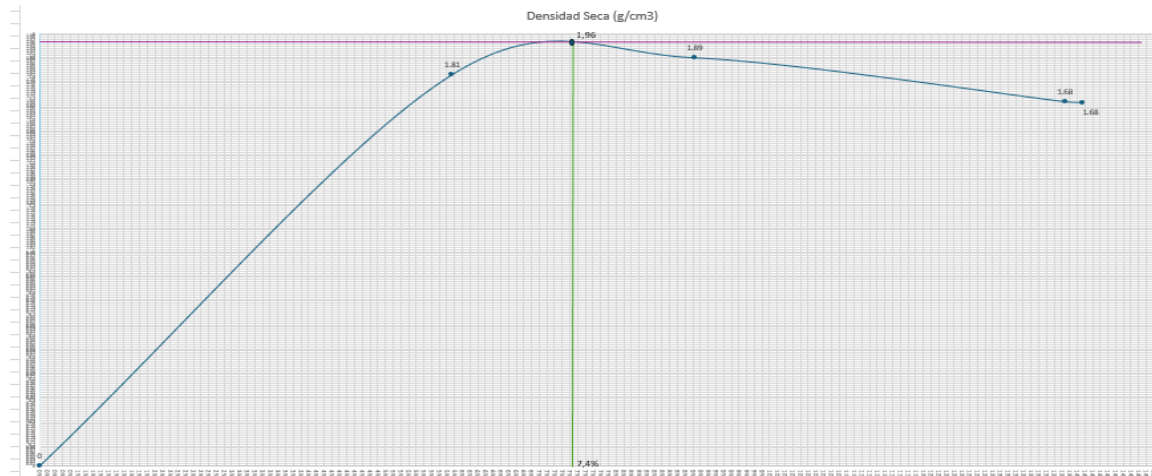


Ilustración 50. Gráfica Densidad Seca Proctor 5%

Fuente: Autoría Propia

4.6.2. Proctor 10%

En este ensayo Proctor, con un porcentaje del 10% de aditivo (cemento), se realizó una dosificación en la que se determinó la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo estabilizado, logrando un comportamiento mecánico favorable en el laboratorio. En esta prueba se trabajó con cuatro muestras, variando oportunamente el contenido de humedad entre el 5% y el 15%, con el objetivo de trazar la curva característica del ensayo Proctor. De esta manera, se evaluó y se identificó el punto de compactación más eficiente. A continuación, en la tabla 17 se presentan los valores obtenidos en este ensayo.

Tabla 16: Datos Ensayo Proctor 10%

MUESTRA	WMH+MOLDE(g)	WMH(g)	DENSIDAD MH(g/CM3)	HUMEDAD %	CANTIDAD AGUA A APLICAR(g)
1	3690,2	1701,7	1,80	5%	110
2	3814,1	1825,6	1,93	8%	176
3	3780,5	1792	1,90	13%	286

4	3691,7	1703,2	1,80	15%	330
---	--------	--------	------	-----	-----

Tabla 17: Corrección de Humedad 10%

W Platón	W m +Platón	Wmh	W mseca +Platón	Wmseca	w(%)	Yd
52,8	355	302,2	339,6	286,8	5,37%	1,81
80,8	662,7	581,9	617	536,2	8,52%	1,89
65,3	544,5	479,2	488,1	422,8	13,34%	1,68
65,6	853,7	788,1	759,5	693,9	13,58%	1,68

Las densidades húmedas obtenidas se encontraron entre 1,80 g/cm³ y 1,90 g/cm³, mientras que las densidades secas corregidas mostraron un rango desde 1,57 g/cm³ hasta un valor máximo de 1,85 g/cm³, alcanzado con un contenido de humedad del 7,5%, que correspondió a la humedad óptima de esta mezcla.

Esta práctica reflejó eficazmente el proceso físico de compactación del suelo, ya que al inicio el aumento de la humedad facilitó el acomodo de las partículas debido a la lubricación del agua, lo que generó un incremento en la densidad seca. Sin embargo, al sobrepasar la humedad óptima, el exceso de agua ocupó los espacios entre las partículas, desplazándolas e impidiendo una compactación eficiente, lo que ocasionó una disminución progresiva de la densidad seca.

A partir de los resultados obtenidos se concluyó que el suelo mezclado con una dosificación del 10% de aditivo presentó un comportamiento típico y favorable para la compactación, alcanzando una buena densidad con un bajo contenido de humedad. Esto lo convirtió en un material significativamente adecuado para su aplicación en campo, ya que permitió un ahorro

considerable de agua durante su uso, a la vez que proporcionó una estructura más densa y resistente. En consecuencia, resultó útil para su implementación en capas de base o subbase en vías, así como en la fabricación de bloques de tierra comprimida (BTC).

En la siguiente tabla se evidenció que, a medida que se incrementó la humedad, la densidad húmeda también aumentó hasta cierto punto. Esto ocurrió porque, en un inicio, el agua ayudó a que las partículas del suelo se acomodaran mejor durante la compactación; no obstante, al existir un exceso de agua, este desplazó las partículas y redujo la densidad alcanzada.

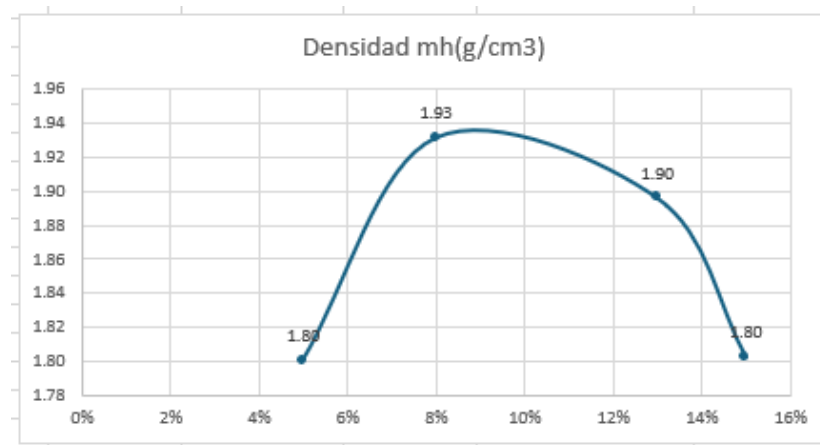


Ilustración 51. Gráfica de Densidad Proctor 10%
Fuente: Autoría Propia

En la siguiente tabla se mostró que, a medida que aumentó la humedad, la densidad seca también se incrementó, alcanzando un punto máximo. En este caso, la densidad seca máxima fue de 1,85 g/cm³, y se presentó cuando la humedad fue del 7,5%.

Después de ese punto, al seguir agregando agua, la densidad seca disminuyó, debido a que el suelo ya no se compactó de manera eficiente.

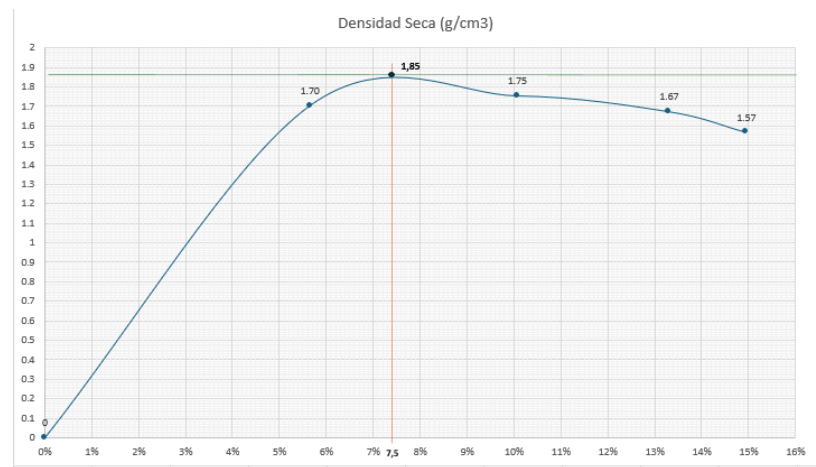


Ilustración 52. Gráfica de Densidad Seca Proctor 10%
Fuente: Autoría Propia

4.6.3. Proctor 15%

Este ensayo Proctor se realizó con una dosificación del 15% de aditivo (cemento). Se evaluó el comportamiento del suelo estabilizado al compactarse bajo diferentes contenidos de humedad, con el objetivo de determinar la humedad óptima que permitiera alcanzar la máxima densidad seca.

Tabla 18: Datos Ensayo Proctor 15%

MUESTRA	WMH+MOLDE(g)	WMH(g)	DENSIDAD MH(g/CM3)	HUMEDAD %	CANTIDAD AGUA A APLICAR(g)
1	3760,5	1772	1,87	5%	110
2	3765,3	1776,8	1,88	8%	176
3	3812,2	1823,7	1,93	13%	286
4	3660,2	1671,7	1,77	15%	330

Tabla 19: Corrección de Humedad 15%

W Platón	W m +Platón	Wmh	W mseca +Platón	Wmseca	w(%)	Yd
65,6	564,9	499,3	538,5	472,9	5,58%	1,78
65,6	580,6	515	542,4	476,8	8,01%	1,74
71,2	637,5	566,3	574	502,8	12,63%	1,71
61,9	622,7	560,8	542,3	480,4	16,74%	1,52

En la figura anterior se analizaron cuatro muestras con diferentes contenidos de humedad.

Los resultados mostraron que la densidad húmeda se encontró en un rango entre 1,77 g/cm³ y 1,93 g/cm³, alcanzando el valor máximo a una humedad aproximada del 12 %.

El aspecto más relevante se evidenció en la curva de densidad seca, donde se obtuvo una densidad máxima de 1,85 g/cm³ a un contenido de humedad del 8,96 %, valor que se definió como la humedad óptima para la mezcla con un 15 % de aditivo.

El análisis detallado de los datos permitió evaluar el comportamiento del suelo compactado. Al inicio, con el incremento del contenido de humedad, la densidad seca aumentó debido a que el agua facilitó la reubicación de las partículas, mejorando la eficiencia de la compactación. Sin embargo, cuando el exceso de agua comenzó a llenar los vacíos y a reducir el contacto entre partículas, la compactación se volvió menos eficiente, generando una disminución de la densidad seca. En este ensayo se observó que la densidad seca descendió hasta 1,52 g/cm³ al superar la humedad óptima, lo que evidenció que agregar más agua no siempre mejoró la compactación del suelo.

En cuanto al comportamiento del suelo con un 15 % de aditivo, se encontró que, aunque se alcanzó una densidad seca máxima similar a la obtenida en el ensayo con 10 % de aditivo, la humedad óptima fue ligeramente menor, lo que sugirió una mejora en la trabajabilidad del

suelo. Se evidenció también que, al incrementar la humedad más allá de la óptima, la densidad seca disminuyó de manera más abrupta en comparación con las otras dosificaciones, indicando que el material fue más sensible al exceso de agua, probablemente debido a la saturación temprana generada por el mayor contenido de aditivo.

Asimismo, se observó que la densidad húmeda aumentó con el incremento de la humedad hasta alcanzar un valor máximo de $1,93 \text{ g/cm}^3$ a un 12 % de humedad. Posteriormente, al continuar aumentando la humedad, la densidad húmeda disminuyó, debido a que el exceso de agua provocó el desplazamiento de partículas y redujo la eficiencia de la compactación.

A continuación, se presenta la gráfica correspondiente que ilustra este comportamiento.

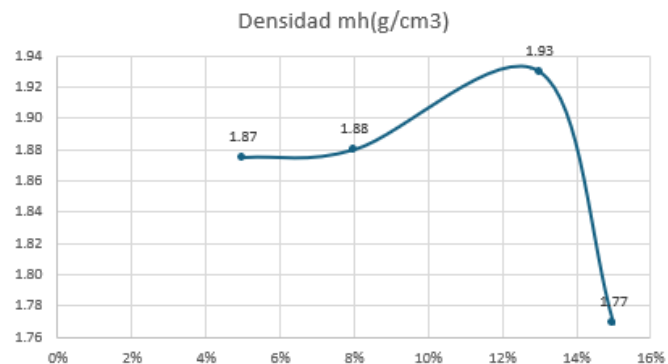


Ilustración 53. Gráfica de Densidad Proctor 15%

Fuente: Autoría Propia

Finalmente, en la última gráfica correspondiente a la dosificación con un 15 % de aditivo, se observó que, a medida que aumentó la humedad, la densidad seca también se incrementó, debido a que el agua facilitó una mejor acomodación de las partículas del suelo. Se alcanzó un valor máximo de $1,85 \text{ g/cm}^3$ a un 8,96 % de humedad, representando el punto máximo de la curva.

Posteriormente, al superar este punto, la densidad seca comenzó a disminuir, ya que el exceso de agua impidió una compactación eficiente. A un contenido de humedad del 15 %, la densidad seca descendió hasta $1,52 \text{ g/cm}^3$, lo que representó una disminución significativa respecto al valor máximo alcanzado.

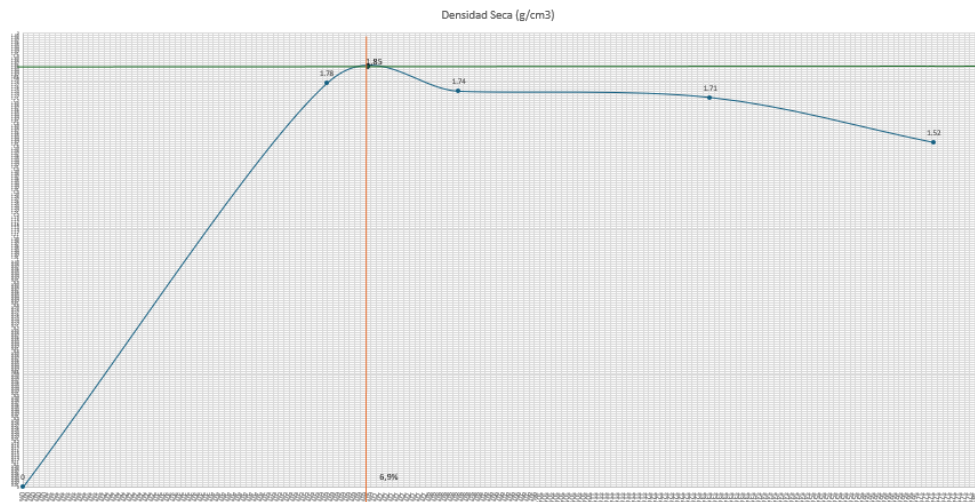


Ilustración 54. Gráfica de Densidad Seca Proctor 15%
Fuente: Autoría Propia

4.7. Elaboración de Bloques de tierra Comprimida (BTC)

Con las dosificaciones diseñadas, se procede a la fabricación de los bloques de tierra comprimida en condiciones en manejo del laboratorio.

Como objetivo es obtener los Bloques de tierra Comprimida (BTC) compactados y estables para luego probarlos. Donde se comprueba si el proceso realizado de mezcla, moldeo y curado es uniforme.

Tabla 20: *Resumen datos obtenidos.*

TABLA DE RESULTADOS									
BLOQUE #	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES			MASA (g)	VOLUMEN (cm ³)	DENSIDAD (kg/m)	CARGA MÁXIMA (KN)	RESISTENCIA (MPa)
		a(cm)	b(cm)	H(cm)					
1	5 % Cemento Sin Cáñamo (14 días)	15	30	10	7981	4500	1,77	78,465	1,744
2	5 % Cemento Con Cáñamo (14 días)	15	30	11	7237	4950	1,46	86,032	1,912
3	5 % Cemento Sin Cáñamo (28 días)	14,9	29,8	10,5	7962	4662	1,71	67,157	1,512
4	5 % Cemento Con Cáñamo (28 días)	15	30	10,8	7138	4860	1,47	43,295	0,962
5	10 % Cemento Sin Cáñamo (14 días)	15	30	11	8176	4950	1,65	81,986	1,821
6	10 % Cemento Con Cáñamo (14 días)	15	30	11	7550	4950	1,53	51,08	1,1351
7	10 % Cemento Sin Cáñamo (28 días)	15	30	11	8106	4950	1,64	67,885	1,524
8	10 % Cemento Con Cáñamo (28 días)	15	30	11	7131	4950	1,44	47,99	1,077
9	15 % Cemento Sin Cáñamo (14 días)	15	30	11	8371	4950	1,69	155,619	3,458
10	15 % Cemento Con Cáñamo (14 días)	15	30	11	7863	4500	1,75	158,823	3,529
11	15 % Cemento Sin Cáñamo (28 días)	14,9	29,8	11	8250	4884	1,69	158,586	3,481

1 2	15 % Cemento								
	Con Cáñamo (28 días)	14,7	30	11	7124	4410	1,62	148,655	3,371

EVALUACIÓN MECÁNICA

Los bloques elaborados fueron sometidos a ensayos de compresión simple, tanto a los 14 días como a los 28 días de curado. Esto permitió medir su resistencia y comportamiento frente a las cargas.

En esta sección se presentaron los resultados comparativos de la resistencia a compresión de los BTC, estabilizados con cemento en porcentajes de 5 %, 10 % y 15 %, con y sin la incorporación de fibras de cáñamo, teniendo en cuenta los periodos de curado de 14 y 28 días. Estos resultados se complementaron con gráficos comparativos y un análisis estadístico, que incluyó la media y los intervalos de confianza, evidenciando los datos obtenidos. Finalmente, los valores fueron verificados con los requerimientos establecidos en la norma NTC 5324.

4.8. Ensayo a compresión Bloques De Tierra Comprimida (BTC)

Para el ensayo de compresión, las muestras fueron preparadas mediante un refrentado por contacto rígido, utilizando placas metálicas planas como superficies de apoyo, en cumplimiento con los criterios establecidos en la NTC 4025 (método de ensayo para unidades de mampostería en compresión). Este tipo de refrentado se utilizó para asegurar la planicidad, alineación axial y uniformidad de distribución de esfuerzos durante la aplicación de carga.

4.8.1. 5% Sin Cáñamo (14 Días)

En este caso, se llevó a cabo un ensayo de compresión. El propósito principal de esta prueba fue evaluar la capacidad resistente de una probeta de concreto bajo esfuerzos de compresión, determinando la carga máxima que soportó y, con base en ella, se calculó la resistencia máxima expresada en Mega pascales (MPa). Las dimensiones obtenidas del BTC fueron:

Tabla 21: *Dimensiones BTC 5% Cemento Sin Cáñamo (14 días)*

MEDIDAS		
a	15	Cm
b	30	Cm
h	11	Cm
w	7891	Kg

En los datos generales del ensayo se concretó que se trabajó con un gradiente de 0,050 MPa/seg y una carga inicial de 1,000 kN, lo cual indicó que la aplicación de la carga se realizó de manera progresiva y controlada. La probeta ensayada presentó un área de 45000 mm², correspondiente al área efectiva sobre la cual se distribuyó la carga aplicada por la máquina.

Los resultados obtenidos mostraron que la carga máxima alcanzada fue de 78,465 kN, valor a partir del cual se calculó una resistencia máxima de 1,744 MPa. Este valor de resistencia representó la tensión máxima que el material pudo soportar antes de iniciar el proceso de falla.

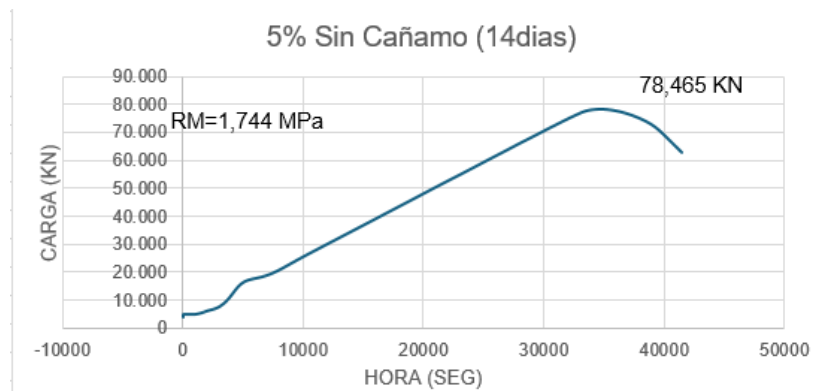


Ilustración 55. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 5% Cemento Sin Cáñamo (14 días)
Fuente: Autoría Propia

El gráfico anterior de carga frente al tiempo permitió observar de manera clara el comportamiento del material durante el ensayo. En una primera fase se presentó un incremento casi lineal de la carga, lo que evidenció una respuesta elástica en la cual el concreto resistió adecuadamente sin mostrar daños visibles.

A medida que la carga aumentó, la gráfica mantuvo una pendiente constante, indicando que la probeta trabajaba en la zona de comportamiento elástico/plástico, donde aún era capaz de soportar incrementos adicionales de esfuerzo.

No obstante, al aproximarse a los 78 kN se alcanzó el pico de carga máxima, punto crítico en el que el material mostró su mayor capacidad resistente. Seguidamente, se observó una caída en la curva, reflejando la pérdida de resistencia del concreto debido a la aparición y propagación de micro fisuras internas, las cuales condujeron finalmente a la falla. Esta disminución confirmó que el material no fue capaz de mantener la misma capacidad portante, marcando así el inicio del colapso progresivo.

El comportamiento registrado fue característico de materiales frágiles como el concreto, que presentan una capacidad inicial de soportar carga dentro de un rango de deformación

limitado, seguida de una ruptura súbita una vez superada la resistencia máxima. La caída de la carga después del punto máximo evidenció que la probeta perdió su integridad estructural y no pudo continuar transmitiendo esfuerzos.

Finalmente, el ensayo de compresión permitió determinar que la probeta alcanzó una resistencia máxima de 1,744 MPa y una carga máxima de 78,465 kN. Estos resultados fueron relevantes para la evaluación de la calidad del concreto, ya que posibilitaron verificar si cumplía con los requisitos de resistencia especificados en el diseño estructural. El comportamiento reflejado en la curva fue consistente con lo esperado en materiales frágiles, mostrando un aumento inicial de la carga hasta el punto de falla y, posteriormente, una reducción en la capacidad resistente.

4.8.2. 5% Con Cáñamo (14 Días)

El ensayo de compresión del BTC con adición del 5 % de cáñamo, realizado a los 14 días, tuvo como objetivo principal determinar la resistencia de una probeta sometida a cargas de compresión aplicadas de manera progresiva. El procedimiento siguió el estándar establecido, en el cual se consideró un área de sección transversal de 45000 mm², una carga inicial de 1.000 kN y un gradiente de incremento de 0,050 MPa por segundo.

Bajo estas condiciones, la probeta alcanzó una carga máxima de 86,032 kN y una resistencia máxima de 1,912 MPa, antes de que el ensayo fuera detenido manualmente. Este aspecto resultó relevante, ya que limitó la observación completa del proceso de falla del material y dejó abierta la posibilidad de que la capacidad portante real fuera superior.

Las dimensiones obtenidas del BTC fueron:

Tabla 22: *Dimensiones BTC 5% Cemento Con Cáñamo (14 días)*

MEDIDAS		
a	14,9	Cm
b	29,8	Cm
h	11	Cm
w	7237	Kg

Se obtuvo un comportamiento que permitió interpretar diversas fases en la respuesta del material. En la primera etapa, la curva ascendió lentamente, lo cual se relacionó con el acomodo de las partículas dentro de la probeta y con la transmisión uniforme del esfuerzo axial. Esta situación resultó normal en los ensayos de compresión y garantizó que los resultados posteriores fueran confiables.

Más adelante, se evidenció un incremento más acelerado de la carga entre los 10.000 y 25.000 segundos aproximadamente, lo que demostró que el material respondió con rigidez y que en ese tramo aún no se presentaron daños estructurales significativos. En esta fase, el comportamiento fue esencialmente elástico, ya que la relación entre carga y deformación resultó más predecible.

A continuación, se presenta la siguiente gráfica.

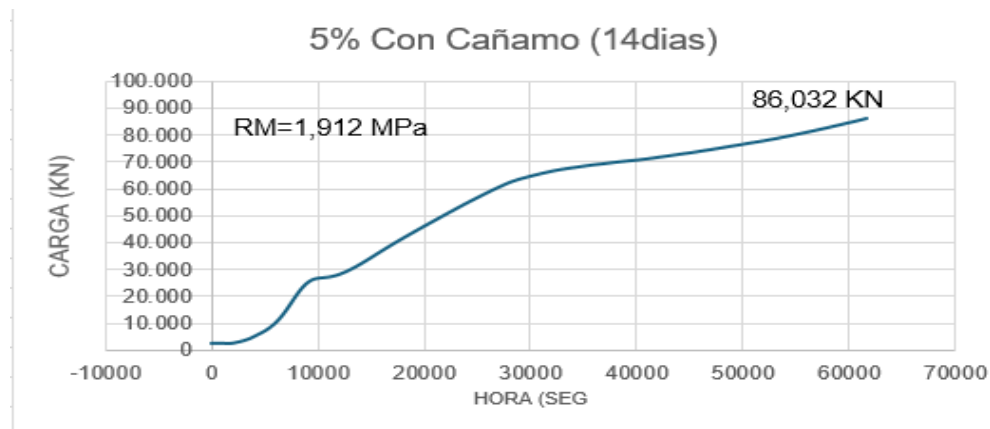


Ilustración 56. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 5% Cemento Con Cáñamo (14 días)
Fuente: Autoría Propia

A medida que el ensayo avanzó entre los 25.000 y 40.000 segundos, se observó una fase de transición en la cual la pendiente de la curva disminuyó. Esto indicó que el material comenzó a perder rigidez, probablemente por la aparición de nuevas micro fisuras internas. Dichas fisuras no representaron una pérdida inmediata de la capacidad portante, pero sí marcaron el inicio de un proceso de debilitamiento interno que, de haberse prolongado el ensayo, se habría acentuado de forma más notoria.

Esta hipótesis se respaldó en la última fase de la curva, donde entre los 40.000 y 60.000 segundos la pendiente se volvió mucho más horizontal, lo cual implicó que el material solo fue capaz de resistir incrementos de cargas menores.

Finalmente, a los 60.000 segundos se alcanzó una carga máxima de 86,032 kN, punto que determinó la interrupción manual de la prueba. En consecuencia, el ensayo no registró la etapa de descenso de la curva, la cual habría evidenciado la reducción de la capacidad de carga y la falla definitiva del material. Este hecho limitó la explicación completa respecto a la ductilidad o fragilidad de la probeta, aunque no invalidó la información obtenida, dado que

los datos recolectados hasta ese momento permitieron concluir que el material presentó una resistencia relativamente baja frente a lo esperado en materiales de alta resistencia, como los aceros o concretos especiales, situándose en un rango más cercano a materiales de uso general.

Esta condición pudo deberse a la naturaleza misma de la muestra, al tipo de preparación, al tiempo de curado en caso de tratarse de concreto o incluso a las condiciones del equipo de ensayo. Más allá de las cifras puntuales, este ensayo evidenció de manera clara que el material atravesó distintas fases bajo compresión: desde un estado elástico inicial hasta una condición crítica cercana a la falla. En este contexto, resultó significativo calificar no solo la carga máxima alcanzada, sino también la forma en que la probeta se comportó durante el proceso, ya que ello permitió proyectar su desempeño ante cargas de servicio en condiciones reales.

Finalmente, se resaltó que la detención manual temprana pudo ocultar información sobre el modo de falla, razón por la cual es fundamental complementar los resultados con otros ensayos o, de ser posible, repetir la prueba hasta la ruptura total, con el fin de establecer con mayor certeza la verdadera capacidad resistente y el mecanismo de falla predominante del material.

4.8.3. 5% Sin Cáñamo (28 Días)

En este caso se desarrolló un ensayo de compresión simple, en el cual se aplicó una carga axial controlada sobre una muestra con un área transversal de 44,022 mm².

Las dimensiones obtenidas del BTC fueron:

Tabla 23: Dimensiones BTC 5% Cemento Sin Cáñamo (28 días)

MEDIDAS		
a	14,9	Cm
b	29,8	Cm
h	11	Cm
w	7962	Kg

Este tipo de ensayos tiene como objetivo evaluar la capacidad de los materiales para resistir cargas de compresión, así como determinar su resistencia máxima, aspecto fundamental para el diseño y análisis estructural. La prueba inició con una carga de 1,000 kN y se aplicó un gradiente de carga de 0,005 MPa/seg, lo cual asegura que la aplicación de los esfuerzos se realizara de manera progresiva y controlada, evitando la aparición de fallas prematuras en la muestra.

En los resultados obtenidos se registró una carga máxima de 67,157 kN, correspondiente al punto más alto soportado antes de la falla. Con base en este valor, se calculó una resistencia máxima de 1,512 MPa. Dichos resultados permiten catalogar el material como uno con resistencia moderada a la compresión, propio de suelos cohesivos muy duros.

En la gráfica de carga frente al tiempo se observa de manera clara el comportamiento de la muestra durante la prueba. Inicialmente, la carga aumenta de manera lineal y constante, lo que refleja un comportamiento elástico y estable. La pendiente uniforme confirma que el ensayo se desarrolló de forma controlada, sin alteraciones en la aplicación de la carga. Finalmente, la curva alcanza el valor máximo cercano a los 67 kN, seguido de una caída

pronunciada que evidencia la pérdida de la capacidad portante del material y marca el inicio de su falla definitiva.

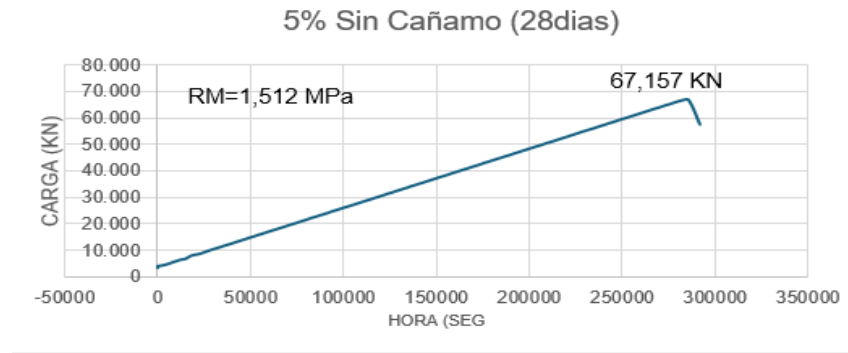


Ilustración 56. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 5% Cemento Sin Cáñamo (28 días)
Fuente: Autoría Propia

Los intervalos intermedios presentados en la tabla del ensayo, correspondientes a tiempos entre 0,05 y 0,40 segundos, muestran cargas crecientes que oscilan entre 3,526 kN y 3,966 kN. Aunque estas magnitudes son menores frente a la carga máxima alcanzada, tienen relevancia ya que reflejan los primeros instantes de la prueba, momento en el cual el material aún no ha desarrollado completamente su comportamiento resistente.

La interpretación de los resultados permite establecer que la resistencia obtenida puede considerarse adecuada, aunque no elevada, lo cual limita su aplicación en elementos estructurales sometidos a cargas de gran magnitud. En la gráfica anterior, la rápida caída posterior al punto máximo puede asociarse con la homogeneidad del material, que, al no presentar variaciones significativas en su microestructura, tiende a fallar de forma súbita una vez alcanzada su capacidad última.

De este modo, la resistencia máxima de 1,512 MPa debe asumirse como el límite último bajo condiciones de compresión simple, siendo necesario aplicar los factores de seguridad adecuados para garantizar un desempeño confiable del material en escenarios reales de servicio.

4.8.4. 5% Con Cáñamo (28 Días)

En este ensayo se analizó una prueba de compresión simple (S-C-VP), mediante la aplicación de una carga progresiva y controlada. La muestra ensayada presentaba un área transversal de 45,000 mm², y la prueba se inició con una carga mínima de 1,000 kN. El gradiente de aplicación de carga fue de 0,005 MPa/seg, lo que aseguró que el esfuerzo se transmitiera de manera gradual, evitando alteraciones en el comportamiento mecánico del material y permitiendo que la curva registrada reflejara una respuesta confiable y representativa.

Las dimensiones obtenidas del BTC fueron:

Tabla 24: Dimensiones BTC 5% Cemento Con Cáñamo (28 días)

MEDIDAS		
a	15	Cm
b	30	Cm
h	11	Cm
w	7281	Kg

En los resultados se destaca que la carga máxima soportada por la muestra fue de 43,925 kN, alcanzando una resistencia máxima de 0,962 MPa. Este valor permite interpretar que se trata de un material con una resistencia relativamente baja frente a los esfuerzos de compresión.

La gráfica de carga contra el tiempo evidencia un comportamiento estable del material durante la aplicación del esfuerzo. Se observa que la curva asciende de manera continua hasta alcanzar un pico cercano a los 44,000 kN, lo que corresponde a la fase elástica del material. En esta etapa, la relación entre la carga aplicada y la deformación generada resulta proporcional y predecible, confirmando que el material respondió de manera adecuada antes de llegar a su límite resistente.

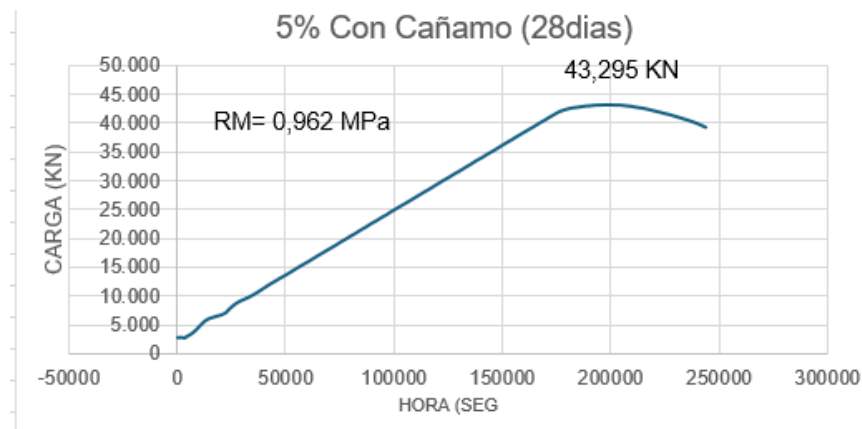


Ilustración 57. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 5% Cemento Con Cáñamo (28 días)
Fuente: Autoría Propia

Los valores iniciales se registraron en intervalos de tiempo entre 0,05 y 0,2 segundos, obteniéndose cargas en un rango de 2,263 kN a 2,718 kN. Aunque estas cifras resultaron pequeñas en comparación con la carga máxima, tuvieron importancia porque reflejaron los primeros instantes de interacción entre la prensa y la muestra, etapa en la cual el material comenzó a ajustarse a las condiciones de carga.

Al analizar la resistencia máxima alcanzada, equivalente a 0,962 MPa, se evidenció que el material presentó una capacidad limitada para resistir esfuerzos de compresión. En comparación con el ensayo anterior, en el que la resistencia alcanzada fue de 1,512 MPa, se concluyó que esta segunda muestra resultó aún más débil.

El descenso posterior al pico de carga registrado en la curva constituyó un elemento fundamental para interpretar la ductilidad o fragilidad del material. Se apreció una disminución en la capacidad portante después de la carga máxima; sin embargo, la curva no presentó un movimiento brusco en su descenso, sino que mantuvo un nivel de carga residual relativamente estable, lo cual aporta información sobre el comportamiento del material tras superar su límite resistente.

EVALUACIÓN MECÁNICA

Los bloques elaborados fueron sometidos a ensayos de compresión simple, tanto a los 14 días como a los 28 días de curado. Esto permitió medir su resistencia y evaluar su comportamiento frente a la aplicación de cargas.

4.9. Determinación Analítica de la Resistencia a Compresión al 10%

Tabla 25: Valores Estimados por Interpolación de la Resistencia a Compresión (10 % Cemento)

TABLA DE RESULTADOS									
BLOQUE#	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES			MASA(g)	VOLUMEN (cm ³)	DENSIDAD	CARGA MAXIMA(KN)	RESISTENCIA
		a(cm)	B(cm)	H(cm)					
1	5 % Cemento Sin Cáñamo (14 días)	15	30	10	7981	4500	1,77	78,465	1,744
2	5 % Cemento Con Cáñamo (14 días)	15	30	11	7237	4950	1,46	86,032	1,912
3	5 % Cemento Sin Cáñamo (28 días)	14,9	29,8	10,5	7962	4662	1,71	67,157	1,512
4	5 % Cemento Con Cáñamo (28 días)	15	30	10,8	7138	4860	1,47	43,295	0,962
5	10 % Cemento Sin Cáñamo (14 días)	15	30	11	8176	4950	1,65	81,986	1,821
6	10 % Cemento Con Cáñamo (14 días)	15	30	11	7550	4950	1,53	51,08	1,1351
7	10 % Cemento Sin Cáñamo (28 días)	15	30	11	8106	4950	1,64	67,885	1,524
8	10 % Cemento Con Cáñamo (28 días)	15	30	11	7131	4950	1,44	47,99	1,077
9	15 % Cemento Sin Cáñamo (14 días)	15	30	11	8371	4950	1,69	155,619	3,458
10	15 % Cemento Con Cáñamo (14 días)	15	30	11	7863	4500	1,75	158,823	3,529
11	15 % Cemento Sin Cáñamo (28 días)	14,9	29,8	11	8250	4884	1,69	158,586	3,481
12	15 % Cemento Con Cáñamo (28 días)	14,7	30	11	7124	4410	1,62	148,655	3,371

La determinación analítica de la resistencia a compresión al 10 % de cemento se realizó mediante interpolación en Excel, a partir de los datos experimentales obtenidos en las dosificaciones del 5 % y 15 % de cemento. Este procedimiento permitió estimar el comportamiento mecánico de los bloques de tierra comprimida (BTC) para un contenido intermedio de cemento, sin necesidad de recurrir a un ensayo directo.

A los 14 días de curado, la resistencia analíticamente determinada para los BTC con 10 % de cemento fue de 1,82 MPa sin incorporación de cáñamo y de 1,13 MPa con cáñamo, evidenciando que la presencia de fibras reduce la capacidad resistente en la etapa inicial. Para los 28 días, los valores obtenidos fueron de 1,52 MPa sin cáñamo y 1,08 MPa con cáñamo, observándose que, aunque la hidratación del cemento incrementó ligeramente la resistencia en los BTC sin fibra, la interacción del cáñamo con la matriz cementicia produjo una pérdida progresiva de desempeño mecánico.

Los resultados estimados mantuvieron una tendencia coherente con los ensayos realizados en laboratorio para las otras dosificaciones, lo que valida el método analítico empleado como herramienta confiable para la evaluación de configuraciones que no fueron probadas físicamente. De esta manera, el contenido del 10 % de cemento se posiciona como una alternativa viable entre la resistencia mecánica y la sostenibilidad del material, aunque la incorporación de cáñamo requiere tratamientos adicionales para mejorar la compatibilidad y la durabilidad de la mezcla.

4.9.1. 15% Sin cáñamo (14 Días)

En el laboratorio se procedió a determinar la resistencia a compresión del bloque de tierra comprimida (BTC), cuyas características geométricas y datos generales fueron previamente registrados. Las dimensiones medidas del BTC fueron:

Tabla 26: Dimensiones BTC 15% Cemento Sin Cáñamo (14 días)

MEDIDAS		
a	15	Cm
b	30	Cm
h	11	Cm
w	8371	Kg

Por tanto, el área de la sección transversal empleada para el cálculo del esfuerzo de compresión fue:

$$A = 15cm * 30cm = 450cm^2 = 45,000mm^2$$

Ecuación 8

Del registro digital de la máquina universal se obtuvo la carga máxima alcanzada durante el ensayo:

$$Carga\ máxima(P_{max}) = 155,619\ kN = 155\ 619\ N$$

La resistencia a compresión se calculó con la formula

$$f_c = \frac{P_{max}}{A}$$

Ecuación 9

Reemplazando con unidades en N/mm² (equivalentes a MPa):

$$f_c = \frac{155,619 \text{ kN}}{45,000 \text{ mm}^2}$$

$$f_c = 3,4582 \text{ N/mm}^2 \approx 3,458 \text{ MPa.}$$

El resultado obtenido fue de 3,458 MPa, valor que se considera coherente para una mezcla de tierra-cemento con agregado fibroso. El cemento al 15 % proporcionó una matriz cementante que otorgó una resistencia moderada, mientras que la incorporación de cáñamo al 5 % incrementó la porosidad y redujo la resistencia. Sin embargo, este refuerzo vegetal aportó beneficios adicionales relacionados con las propiedades térmicas y acústicas del material.

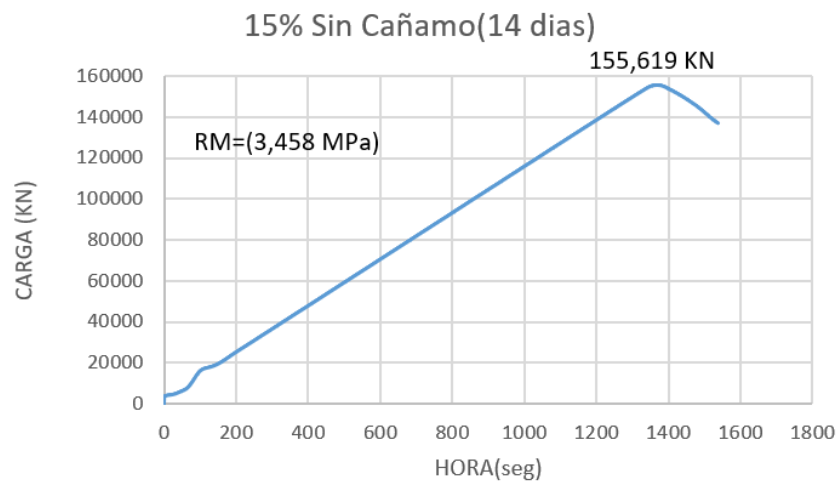


Ilustración 58. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 15% Cemento Sin Cáñamo (14 días)

Fuente: Autoría Propia

4.9.2. 15% Con cáñamo (14 Días)

Para la elaboración de este laboratorio se determinaron las dimensiones del bloque de tierra comprimida (BTC), las cuales fueron las siguientes:

Tabla 27: Dimensiones BTC 15% Cemento Con Cáñamo (14 días)

MEDIDAS		
a	15	Cm
b	30	Cm
h	11	Cm
w	7863	Kg

Con las dimensiones registradas, se calculó una densidad aparente de 1,747 kg/m³. Este valor resultó coherente con mezclas que incorporan agregados ligeros como el cáñamo y corresponde a un material de densidad media.

Se realizaron dos ensayos de compresión sobre este bloque. En el primero no se evidenció una deformación significativa, únicamente la aplicación de la carga inicial. Por tal motivo, se decidió seleccionar el segundo bloque (BTC), el cual mostró un proceso claro de deformación y permitió obtener resultados más representativos.

En el ensayo con la máquina universal, la muestra alcanzó una carga máxima de 158,823 kN, a partir de la cual se calculó una resistencia a compresión de 3,529 MPa. La gráfica correspondiente reflejó un aumento casi lineal de la carga hasta el momento de la falla, comportamiento que evidenció la fragilidad característica de los materiales cementados y de los bloques con agregados de naturaleza porosa.

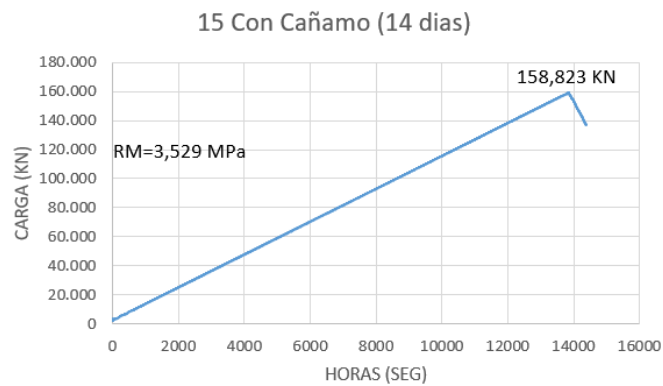


Ilustración 59. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 15% Cemento Con Cañamo (14 días)

Fuente: Autoría Propia

En cuanto a la coherencia con la dosificación, los niveles de resistencia y densidad obtenidos se ubicaron dentro del rango esperado para bloques estabilizados que incorporan un 15% de cemento y un 5% de cañamo. Este comportamiento se explica porque la adición de fibras vegetales tiende a disminuir la resistencia mecánica e incrementar la porosidad; sin embargo, aporta beneficios en términos de aislamiento térmico y acústico.

El contenido de cemento empleado (15%) resultó relativamente alto en comparación con otros suelos estabilizados, lo cual aseguró un adecuado desarrollo de resistencia temprana. No obstante, también implica un mayor impacto ambiental y económico. En este sentido, si se optimizan los procesos de compactación y curado, podría evaluarse una reducción del porcentaje de cemento en futuros diseños sin comprometer de manera significativa el desempeño mecánico.

La curva de carga obtenida evidenció un comportamiento frágil, con una caída abrupta posterior al pico de resistencia. Este resultado sugiere que las fibras no alcanzaron una adecuada adherencia ni distribución en la matriz cementicio, probablemente debido a la escasa cantidad de agua efectiva y a las propiedades absorbentes del material vegetal.

4.9.3. 15% Sin cáñamo (28 Días)

Para el BTC del 15% de cemento sin agregado de cáñamo dieron las siguientes dimensiones:

Tabla 28: Dimensiones BTC 15% Cemento Sin Cáñamo (28 días)

MEDIDAS		
a	14,9	Cm
b	29,8	Cm
h	11	Cm
w	8250	Kg

Con base en las propiedades geométricas medidas, se determinó un volumen de 4879,82 cm³ para la muestra, lo que permitió calcular una densidad estimada de 1,69 g/cm³. Este valor reflejó una compactación adecuada y una masa dentro de los rangos esperados para bloques de tierra comprimida estabilizados con cemento, lo cual resultó significativo en relación con su comportamiento mecánico y durabilidad.

En el ensayo de compresión simple, el BTC alcanzó una carga máxima de 155,586 kN antes de la falla, equivalente a una resistencia a compresión de 3,481 MPa. Este resultado fue relevante, pues evidenció un desempeño estructural satisfactorio, superando ampliamente el límite mínimo de 2,0 MPa establecido en la NTC 5324 para unidades de mampostería no estructural, y acercándose a los valores exigidos para elementos de mampostería estructural en edificaciones de baja altura.

La resistencia alcanzada confirmó que una dosificación del 15 % de cemento generó una matriz cementante rígida y estable, capaz de garantizar la integridad del bloque sin necesidad de refuerzos adicionales. La ausencia de cáñamo en esta combinación se tradujo en un incremento de la densidad y rigidez, lo que potenció la resistencia mecánica; sin embargo, también redujo el potencial aislante térmico y acústico que las fibras vegetales podrían aportar.

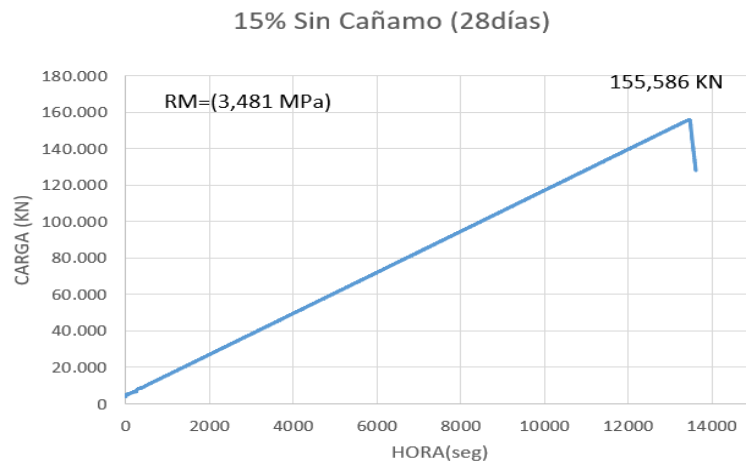


Ilustración 60. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 15% Cemento Sin Cáñamo (28 días)
Fuente: Autoría Propia

4.9.4. 15% Con cáñamo (28 Días)

Se procedió a registrar las dimensiones del bloque de tierra comprimida (BTC), obteniendo los siguientes valores:

Tabla 29: Dimensiones BTC 15% Cemento Con Cáñamo (28 días)

MEDIDAS		
a	14,7	Cm
b	30	Cm
h	10	Cm
w	7124	Kg

La densidad aparente del bloque con un 15 % de cáñamo se estimó en $1,615 \text{ kg/m}^3$, valor que lo ubica dentro de la categoría de materiales ligeros al compararlo con BTC convencionales sin fibras, los cuales suelen presentar densidades superiores. Esta reducción está directamente asociada al efecto del cáñamo, cuyas fibras vegetales incrementan la porosidad y disminuyen el grado de compactación de la matriz, dando como resultado un producto final más liviano y de manipulación sencilla en obra.

En cuanto al comportamiento mecánico, el bloque alcanzó una carga máxima de 148,655 kN, equivalente a una resistencia a la compresión de 3,371 MPa. Este valor se encuentra dentro de los rangos definidos por normativas como la UNE 41410 y la NTC 5324, que establecen resistencias mínimas entre 2,0 y 3,5 MPa para unidades de mampostería de tierra estabilizada. En consecuencia, el bloque cumple con los requisitos técnicos para ser empleado en aplicaciones no estructurales de mampostería y, en determinados casos, en mampostería estructural de baja altura.

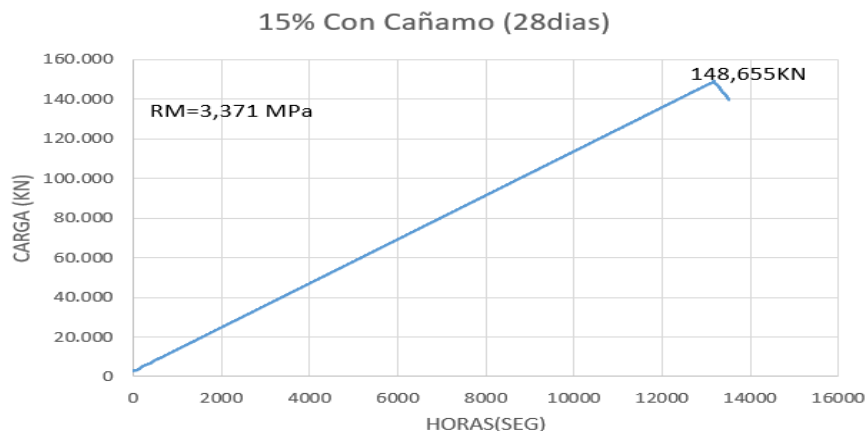


Ilustración61. Gráfica de Carga (KN) Vs Hora (sg) del 15% Cemento Con Cáñamo (28 días)
Fuente: Autoría Propia

El cáñamo en la mezcla cumplió dos funciones en el rendimiento del bloque: en primer lugar, actuó como un refuerzo natural al absorber parte de la energía y retardar el avance de las grietas, lo que proporcionó mayor tenacidad y controló la fisuración. En contraste, su elevada porosidad y su carácter orgánico provocaron una reducción de la densidad y de la resistencia en comparación con los materiales elaborados únicamente a partir de áridos minerales. Sin embargo, se evidenció un balance positivo en la dosificación del 15 %, ya que se logró una resistencia adecuada sin afectar la trabajabilidad del material. Además, se obtuvo un bloque más ligero y con beneficios en términos de sostenibilidad y eficacia constructiva.

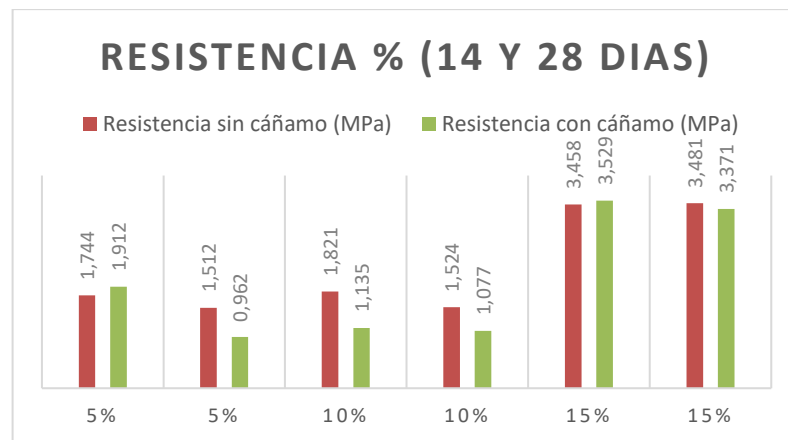


Ilustración 62. Gráfica Resistencia a compresión de los porcentajes en los días 14 y 28
Fuente: Autoría Propia

En este caso, la comparación de los resultados de la resistencia entre las mezclas de la fibra de cannabis y sin ella, evaluando los porcentajes de cemento (5%, 10% y 15%), permite identificar como involucra la incorporación del cáñamo en el desempeño de material. En general, se analiza y se observa que la resistencia aumenta al incremento del cemento.

En el porcentaje del 5% de cemento, la mezcla de cáñamo presenta una resistencia ligeramente mayor respecto a la mezcla sin el cáñamo, siendo así, en proporciones bajas de cemento, el cáñamo puede contribuir positivamente al desempeño, probablemente mejorando la compactación interna o la distribución de vacíos.

Sin embargo, en el porcentaje de 10% de cemento ocurre, al contrario. Debido a que la resistencia de las muestras con el cáñamo es significativamente menor frente a las muestras sin cáñamo. Con la baja dada se asocia a la absorción de agua por parte del cáñamo, una posible falta de saturación previa del material vegetal o variaciones en la compactación, factores que pueden debilitar la adhesión entre el cemento y las partículas de cáñamo.

Para el porcentaje de 15% de cemento, los datos de la resistencia entre las mezclas con y sin cáñamo son muy similares. Se observa en una muestra que la resistencia se incrementó incluyendo el cáñamo.

En conclusión, los resultados indican que el cáñamo no compromete la resistencia del material en los porcentajes de cemento (5% y 15%). En el porcentaje 10% se reducen en los factores de absorción, mezcla y como también en la compactación que pudo comprometer en el desempeño final. Por tanto, se concluye que la adición de cáñamo es compatible con la mezcla siempre que se controlen adecuadamente las condiciones de humedad y dosificación.

5. Conclusiones

- Los resultados permitieron comprobar que el cáñamo es un material viable como complemento en la fabricación de BTC, dado que contribuyó a disminuir la densidad

aparente y mejorar la manipulación durante la producción. Sin embargo, también se evidenció que su incorporación sin tratamiento previo puede reducir la resistencia mecánica y afectar la durabilidad, lo que confirma la necesidad de aplicar procesos de estabilización o recubrimiento a las fibras para optimizar su desempeño.

- Se logró formular y fabricar bloques con diferentes dosificaciones de cemento (5 %, 10 % y 15 %), con y sin cáñamo, evidenciando que el incremento del contenido de cemento mejoró la resistencia mecánica. Asimismo, el cáñamo actuó como un refuerzo natural que aumentó la tenacidad y redujo la fisuración, aunque también elevó la porosidad lo que afectó parcialmente la compacidad del bloque. La mezcla con 10 % de cemento se posicionó como una alternativa equilibrada entre resistencia, costo y sostenibilidad, mientras que la mezcla al 15 % garantizó ampliamente el cumplimiento normativo.
- Los ensayos de resistencia mostraron que los BTC estabilizados con 15 % de cemento (con y sin cáñamo) alcanzaron resistencias entre 3,37 y 3,48 MPa, cumpliendo con los requisitos establecidos (UNE 41410 y NTC 5324). En cambio, las dosificaciones del 5 % no alcanzaron los mínimos exigidos. Los bloques con 10 % de cemento obtuvieron resistencias aceptables, aunque inferiores a las del 15 %, lo que evidencia su potencial siempre que se optimice el tratamiento del cáñamo para controlar la absorción y porosidad.

- Se determinó que el uso de cáñamo en BTC representa una alternativa técnicamente viable para proyectos de vivienda social y autoconstrucción, especialmente en zonas rurales, debido a su bajo costo, amplia disponibilidad y beneficios ambientales. Su incorporación aporta a la reducción del impacto ambiental, al mejor desempeño térmico y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la disminución de emisiones de CO₂, y la promoción de materiales de bajo impacto. Con ajustes adecuados en dosificación y tratamiento de las fibras, los BTC con cáñamo pueden integrarse como un componente sostenible dentro de sistemas constructivos contemporáneos.

6. Alcances y Límites

- El estudio se centró exclusivamente en la resistencia a compresión como parámetro mecánico.
- No se evaluaron otras propiedades críticas como durabilidad, absorción de agua, resistencia al fuego o desempeño térmico en condiciones reales de servicio.
- Las pruebas se realizaron en condiciones de laboratorio, lo cual limita la extrapolación directa a escenarios constructivos de gran escala.

7. Proyecciones

- Realizar ensayos de durabilidad a largo plazo, absorción de agua, comportamiento frente a ciclos de humedad/secado y resistencia al fuego.
- Explorar la optimización de las fibras de cáñamo mediante tratamientos previos (recubrimientos, estabilización química) que aumenten su compatibilidad con el cemento.

- Ampliar el estudio hacia un análisis de costos, impacto ambiental y ciclo de vida, comparando con materiales convencionales.
- Impulsar la inclusión del cáñamo en las normativas de construcción, dada su potencialidad como material sostenible.

8. Recomendaciones de aplicación práctica

- Promover el uso de BTC con cáñamo en programas de vivienda social y autoconstrucción, aprovechando su bajo costo, facilidad de producción y beneficios térmicos.
- Fomentar proyectos piloto en comunidades rurales donde la disponibilidad de tierra y cáñamo pueda reducir costos y dependencia de materiales convencionales.
- Desarrollar manuales técnicos y guías de diseño que permitan replicar el proceso de fabricación y garantizar calidad en obra.
- Incentivar la articulación entre universidades, sector productivo y entidades normativas para consolidar la investigación en BTC con cáñamo y lograr su aprobación en la normativa nacional.

7. Glosario

AASHTO: Asociación Americana de funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte, encargada de normativas y clasificaciones de suelos.

Adición/Adicional (Aditivo): Material incorporado a la mezcla de suelo-cemento para modificar sus propiedades, como resistencia o trabajabilidad.

Arcilla: Suelo de grano muy fino con alta plasticidad y baja permeabilidad.

Bloque de Tierra Comprimida (BTC): Unidad de construcción elaborada a partir de suelo estabilizado y compactado en moldes, con o sin adición de cemento o fibras.

CBR: Ensayo que mide la capacidad de soporte de un suelo frente a cargas, expresado como porcentaje.

Carga máxima: Valor más alto de fuerza que soporta una muestra antes de fallar en un ensayo de compresión.

Cohesión: Fuerza de atracción entre partículas de un suelo fino, que le confiere resistencia al esfuerzo cortante.

Compactación: Proceso de densificación del suelo mediante energía mecánica para reducir vacíos y mejorar resistencia.

Curado: Proceso de conservación de humedad y temperatura en materiales cementicios para desarrollar resistencia.

Densidad seca: Relación entre la masa de los sólidos y el volumen total del suelo, excluyendo el agua.

Densidad aparente: Relación entre la masa total (incluyendo vacíos) y el volumen del suelo o bloque.

Defloculante: Sustancia química que evita la aglomeración de partículas finas en suspensión.

Deformación: Cambio en la forma o dimensiones de un material cuando se somete a esfuerzos.

Dosificación: Proporción de materiales utilizada en la elaboración de mezclas (suelo, cemento, fibras).

Falla: Pérdida de la capacidad portante de un material cuando alcanza su resistencia máxima.

Gravedad específica (Gs): Relación entre el peso de un volumen de sólidos y el peso de un volumen igual de agua destilada.

Hidrómetro: Instrumento que mide la densidad de una suspensión en función del tiempo, usado en análisis granulométrico por sedimentación.

Índice de vacíos (e): Relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos de un suelo.

Interpolación: Método matemático para estimar valores intermedios dentro de un conjunto de datos conocidos.

Limo: Fracción de suelo de tamaño intermedio entre arcillas y arenas, con baja plasticidad.

Menisco: Curvatura de la superficie de un líquido en un recipiente; se lee en la parte inferior para evitar errores de medición.

Módulo elástico: Relación entre esfuerzo y deformación en la zona elástica del material.

Norma Técnica Colombiana (NTC): Estándar oficial para regular métodos de ensayo y materiales en Colombia.

Norma Sismo Resistente 2010 (NSR-10): Reglamento colombiano que establece criterios de diseño y construcción sismo resistente.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Agenda global de la ONU que orienta prácticas sostenibles en diferentes sectores, incluida la construcción.

Picnómetro: Frasco de vidrio calibrado utilizado para determinar la gravedad específica de los suelos.

Porosidad (n): Relación entre el volumen de vacíos y el volumen total del suelo.

Proctor modificado: Ensayo de laboratorio que determina la relación entre humedad y densidad seca de un suelo compactado.

Resistencia a compresión: Capacidad máxima de un material para soportar fuerzas de aplastamiento.

Sedimentación: Proceso de decantación de partículas sólidas en un fluido bajo la acción de la gravedad.

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, método internacional para clasificar suelos según tamaño de partículas y plasticidad.

Tamiz: Instrumento de malla metálica usado para separar partículas de suelo según su tamaño.

Tenacidad: Capacidad de un material para absorber energía antes de romperse.

Viscosidad: Propiedad de un fluido que mide su resistencia a fluir.

8. Referencias

1. Brümmer, M. (2018). Ecobloques de fibra de cáñamo. Entrevista a Monika Brümmer. Igma. <http://www.cannabric.com/>
2. Guzmán, A., & Manrique, C. (2017). Uso de materiales alternativos para la construcción de vivienda: Ecobloques a base de plástico reciclado. *Revista de Arquitectura*, 19(1), 57–68. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2017.19.1.2086>
3. Arteaga Medina, K. T., Medina, O. H., & Gutiérrez Junco, O. J. (2011). Bloque de tierra comprimida como material constructivo. *Revista Facultad de Ingeniería*, 20(31), 55–68. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940770005>
4. Mendoza Torres, J. A., García Moncada, M. C., & Arévalo, J. F. (2019). Bloques de tierra comprimida (BTC) con adición de residuos de construcción y demolición (RCD). *Revista de Arquitectura*, 21(1), 67–79. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.2457>
5. Ríos Tocua, J. S., & Martínez Segura, J. Y. (2021). Estudio de viabilidad para desarrollar un emprendimiento, enfocado en la creación de una empresa productora de ladrillos ecológicos hechos con fibra de cáñamo en el departamento del Cauca [Trabajo de grado, Fundación Universitaria Unicatólica]. Repositorio Institucional Unicatólica.
6. Martínez Reyes, J., Muñoz Ortega, J., & Mora Gómez, E. (2021). Estrategia competitiva en el sector construcción: Caso empresa Promotora Andina. *Revista Espacios*, 42(5), 21–31. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8890533>
7. Cárcel-Carrasco, J., Martínez-Corral, A., Llinares, J., & Kaur, J. (2022). Alternativas ecológicas de los materiales tradicionales en la construcción sostenible. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 11(1), 17–29. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2022.v11n1e41.17-29>
8. Sánchez-Hernández, Y. J., Martínez-Montaña, M., & Gutiérrez-Junco, O. (2021). Estrategia competitiva en el sector construcción: Uso de fibras de cáñamo. *Revista Venezolana de Gerencia*, 26(Número Especial 5), 578–595. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.26.e5.37>
9. Molina Velasco, Y., Cuervo Santander, E., & Salas Morelo, J. (2023). Estudio de la viabilidad para la elaboración de ladrillos ecológicos a base de cáñamo de cannabis en la empresa Aprocor para aprovechar el desperdicio dejado por el proceso productivo actual [Trabajo de grado, Institución Universitaria Antonio José Camacho].

10. Rubiano Collazos, J. N., & Gallo Rivera, L. (2023). Uso de cáñamo como aislante térmico para construcciones de adobe en el páramo colombiano [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia].
11. San Martín Espinosa, Y. S. (2022). Materiales aislantes alternativos en la ingeniería civil [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia].
12. Mancera León, V. (2022). Revisión teórica del estudio comparativo en bloques de arcilla y cáñamo industrial como alternativa de construcción sostenible [Monografía de grado, Universidad Santo Tomás].
13. Alvarado, C. (1983). Uso y manejo de la máquina CINVA-RAM. Instituto Colombiano Agropecuario, Subgerencia de Desarrollo Rural.
14. Bohórquez Quiroz, D. M., & Serrato Mayorga, E. (2023). Bloque de Tierra Comprimido BTC como una alternativa de construcción sostenible en el sector rural de la ciudad de Popayán [Trabajo de grado, Fundación Universitaria de Popayán].
15. Rodríguez Pérez, D. A. (2023). El Cannabis sativa como material alternativo en la construcción: uso del cáñamo en Colombia en la fabricación de bloques para muros divisorios [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia].
16. García Marrero (2023) Bloques de tierra portantes con agregados de cáñamo: ¿Una alternativa para la construcción de viviendas? Textos de Tecnología - Materia, Universidad de la República, Uruguay.
17. Cárcel-Carrasco, J., Martínez-Corral, A., Llinares, J., & Kaur, J. (2022). Alternativas ecológicas de los materiales tradicionales en la construcción sostenible. 3C Tecnología, 11(1), 17–29. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2022.v11n1e41.17-29>
18. Aranda-Jiménez, Y. G., & García-Izaguirre, V. M. (2016). Efectos de utilización de savias vegetales en bloques de tierra comprimida a la prueba de abrasión. Legado de Arquitectura y Diseño, (19), 101–110. <https://doi.org/10.20868/uj.2016.19>
19. Rodríguez Pérez, D. A. (2023). El Cannabis Sativa como material alternativo en la construcción: Uso del cáñamo en Colombia en la fabricación de bloques para muros divisorios [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Piloto. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12345.67890>
20. Ríos Tocua, J. S., & Martínez Segura, J. Y. (2021). Estudio de viabilidad para desarrollar un emprendimiento enfocado en la creación de una empresa productora de ladrillos ecológicos hechos con fibra de cáñamo en el departamento del Cauca [Trabajo de grado, Fundación Universitaria Unicatólica]. Repositorio Institucional Unicatólica. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.98765.43210>
21. Belalcázar Abadía, M. (2022). Valorización de los residuos del cultivo cannabis (Cannabis sativa) para su aplicación en la industria de la construcción [Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio Institucional UAO.
22. Terreros Rojas, L. E., & Carvajal Corredor, I. L. (2016). Análisis de las propiedades mecánicas de un concreto convencional adicionando fibra de cáñamo [Trabajo de

- grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica.
23. Molina Velasco, Y., Cuervo Santander, E., & Salas Morelo, J. (2023). Estudio de la viabilidad para la elaboración de ladrillos ecológicos a base de cáñamo de cannabis en la empresa Aprocor para aprovechar el desperdicio dejado por el proceso productivo actual [Trabajo de grado, Institución Universitaria Antonio José Camacho].
 24. San Martín Espinosa, Y. S. (2022). Materiales aislantes alternativos en la ingeniería civil [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia].
 25. Laguna-Torres, C. A., González-López, J. R., Guerra-Cossío, M. Á., Guerrero-Baca, L. F., Chávez-Guerrero, L., Figueroa-Torres, M. Z., & Zaldívar-Cadena, A. A. (2024). Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 419, 135449.
 26. Galindo-Díaz, J., Escorcia-Oyola, O., & González-Calderón, A. J. (2023). El Centro Interamericano de Vivienda - CINVA y los orígenes de la experimentación con bloques de tierra comprimida (BTC) en la vivienda social (1953-1957). *Informes de la Construcción*, 75(570), e503. <https://doi.org/10.3989/ic.6183>
 27. Cabrera, S., Darras, G., & Losa, N. (2024). Evaluación del proceso de prensado en la fabricación de bloques de tierra comprimida. *Informes de la Construcción*, 76(574), 6524. <https://doi.org/10.3989/ic.6524>
 28. Rodríguez Pérez, D. A. (2023). El Cannabis Sativa como material alternativo en la construcción: uso del cáñamo en Colombia en la fabricación de bloques para muros divisorios [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia].
 29. Garralón Jorba, J. (2011). ¿Por qué cilindros de 15 x 30 cm para obtener la resistencia a compresión del hormigón? *Informes de la Construcción*, (351-352), 55–68. <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>
 30. Bermúdez Rojas, J. A., Cifuentes Baquero, M. F., & Daza Gómez, M. J. (2021). Prototipo de ladrillo a partir de fibra vegetal de cáñamo, como una alternativa sostenible a los ladrillos de arcilla tradicional usados en la construcción de edificios de uso residencial en la ciudad de Bogotá [Trabajo de investigación, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca].
 31. ASTM International. (2007). ASTM D422-63(2007): Standard test method for particle-size analysis of soils.
 32. Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-124: Granulometría por lavado. Especificaciones de ensayos de materiales para carreteras. INVIAS.
 33. ICONTEC. (2018). NTC 1522: Suelos. Métodos de ensayo para la determinación de la granulometría por tamizado y lavado. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

34. Instituto Nacional de Vías. (2007). INV E-128-07: Determinación de la gravedad específica de los suelos finos. Especificaciones de ensayos de materiales para carreteras. INVIAS.
35. Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-122-13: Contenido de humedad natural. Especificaciones de ensayos de materiales para carreteras. INVIAS.
36. ICONTEC. (2018). NTC 1522: Suelos. Métodos de ensayo para la determinación de la granulometría por tamizado y por hidrometría. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
37. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10. Título D: Materiales y mezclas. <https://www.minvivienda.gov.co>
38. ICONTEC. (2018). NTC 5324: Estabilización de suelos para fines de ingeniería civil. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
39. ICONTEC. (2004). NTC 5324: Unidades de mampostería de suelo-cemento. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
40. Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones. <https://www.minambiente.gov.co>
41. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones. <https://www.minambiente.gov.co>
42. ICONTEC. (2004). NTC 5324: Unidades de mampostería de suelo-cemento. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
43. (ICONTEC, 2016). NTC 150: Suelos. Métodos de ensayo para determinar límites de Atterberg. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
44. ICONTEC. (2014). NTC 2373: Suelos. Determinación de la gravedad específica de los sólidos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
45. Walker, R., Pavía, S., & Mitchell, R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp–lime concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 340–348.
46. Millogo, Y., Morel, J. C., Aubert, J. E., & Ghavami, K. (2016). Experimental analysis of the impact of plant fibers on the thermal and mechanical properties of earth blocks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016030.