

**TRABAJO DE GRADO MODALIDAD PROFUNDIZACIÓN, PARA OBTENER EL
TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS**

**ESTABILIZACIÓN DE SUELO ARCILLOSO DE ALTA PLASTICIDAD,
CARACTERÍSTICO DEL DISTRITO DE BUENAVENTURA UTILIZANDO CENIZA DE
CASCARA DE COCO Y CENIZA DE CONCHA DE MOLUSCO (ANDARA
MOLLUSCA)**



**PRESENTADO POR:
SANDRO BANGUERA GARCES**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
POPAYÁN
2023**

**TRABAJO DE GRADO MODALIDAD PROFUNDIZACIÓN, PARA OBTENER EL
TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS**

**ESTABILIZACIÓN DE SUELO ARCILLOSO DE ALTA PLASTICIDAD,
CARACTERÍSTICO DEL DISTRITO DE BUENAVENTURA UTILIZANDO CENIZA DE
CASCARA DE COCO Y CENIZA DE CONCHA DE MOLUSCO (ANDARA
MOLLUSCA)**

**PRESENTADO POR:
SANDRO BANGUERA GARCES**

**DIRECTOR:
Ph.D. FERNEY QUIÑONES SINISTERRA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
POPAYÁN
2023**

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Justificación.....	5
2. Objetivos	7
2.1. Objetivo general	7
2.2. Objetivos específicos	7
3. Marco teórico	8
3.1. Conceptos básicos.....	8
3.2. Caracterización de los residuos agrícolas.....	9
3.2.1. Cáscara de coco.....	9
3.2.2. Concha de molusco.....	11
3.3. Investigaciones previas.....	13
4. Metodología	22
4.1. Tipo y diseño de investigación	23
4.2. Marco normativo	27
4.3. Marco geográfico	28
4.4. Trabajo de campo	30
4.4.1. Muestras de suelo patrón (Suelo fino de alta plasticidad CH)	30
4.4.2. Ceniza de cáscara de coco	32
4.4.3. Ceniza de concha de molusco.....	33
4.4.4. Mezcla de suelo con estabilizante.....	35
4.5. Ensayos de laboratorio	36
4.5.1. Potencial de expansividad en el aparato de Lambe (INV E - 120)	36

4.5.2.	Granulometría (INV E - 123).....	37
4.5.3.	Límite líquido (INV E - 125)	38
4.5.4.	Límite plástico e índice de plasticidad (INV E - 126)	39
4.5.5.	Límite de contracción (INV E - 127).....	39
4.5.6.	Gravedad específica (INV E - 128).....	39
4.5.7.	Azul de Metileno (INV E 235)	40
4.5.8.	CBR de los suelos (INV E - 148).....	41
4.5.9.	Resistencia a la compresión inconfiada (INV E 602).....	43
5.	Análisis de resultados	45
5.1.	Caracterización física de los materiales en estado natural	45
5.1.1.	Granulometría.....	45
5.1.2.	Gravedad específica.....	49
5.1.3.	Límites de Atterberg	50
5.1.4.	Valor de Azul de Metileno	51
5.2.	Caracterización mecánica del suelo en estado natural	52
5.2.1.	Relación humedad - Peso unitario seco (Ensayo Proctor)	52
5.2.2.	Potencial de expansión en el aparato de Lambe.....	53
5.2.3.	Ensayo CBR para muestra de suelo en estado natural.....	54
5.2.4.	Ensayo CBR en muestra de suelo inalterada	56
5.2.5.	Resistencia a la compresión inconfiada.....	57
5.3.	Mezclas de suelo estabilizadas con diferentes porcentajes de ceniza de cáscara de coco	60
5.3.1.	Límites de Atterberg	60
5.3.2.	Potencial de expansión en el aparato de Lambe.....	64

5.3.3. Resistencia a la compresión inconfiada.....	68
5.4. Mezclas de suelo estabilizadas con diferentes porcentajes de ceniza de concha de molusco	70
5.4.1. Límites de Atterberg	70
5.4.2. Potencial de expansión en el aparato de Lambe	74
5.4.3. Resistencia a la compresión inconfiada.....	79
5.5. Ensayo CBR sobre la mezcla de suelo con estabilizante que ha presentado los mejores resultados.	81
6. Conclusiones.....	83
7. Recomendaciones	84
8. Bibliografía	85

Índice de ilustraciones

Tabla 1. Composición química de ceniza de cáscara de coco (CCC).....	10
Tabla 2. Composición química de ceniza de cáscara de coco (CSA) y ceniza de fibra de coco (CHA).....	10
Tabla 3. Composición química de carbón de cáscara de coco.	11
Tabla 4. Composición química de conchas de mar.....	11
Tabla 5. Composición química de ceniza de concha de mar (Sea Shell ash - SSA).....	12
Tabla 6. Composición química de ceniza de concha de Berberecho (Periwinkle Shell ash - PSA).	13
Tabla 7. Normas INVIAS utilizadas.....	27
Tabla 8. Datos del ensayo de granulometría - Ceniza de cáscara de coco.....	45
Tabla 9. Datos del ensayo de granulometría - Concha de molusco.....	46
Tabla 10. Datos del ensayo de granulometría (Tamizado) - Suelo - Buenaventura.....	47
Tabla 11. Datos del ensayo de granulometría (Hidrómetro) - Suelo - Buenaventura.....	48
Tabla 12. Resultados de gravedad específica - Ceniza de coco - Pasa N°200.	49
Tabla 13. Resultados de gravedad específica - Concha de molusco - Retenido N°4.	49
Tabla 14. Resultados de gravedad específica - Concha de molusco - Pasa N°4, Retenido N°200.	49
Tabla 15. Resultados de gravedad específica - Concha de molusco - Pasa N°200.....	50
Tabla 16. Resultados de gravedad específica - Suelo - Buenaventura.....	50
Tabla 17. Resultados de los límites de Atterberg y Clasificación SUCS - Suelo - Buenaventura.	50
Tabla 18. Resultados de Valor de Azul de Metileno - Suelo - Buenaventura.....	51
Tabla 19. Resultados del Ensayo Proctor Estándar - Suelo - Buenaventura.	52
Tabla 20. Datos del ensayo CBR de la muestra compactada en laboratorio - Suelo - Buenaventura	54

Tabla 21. Datos del ensayo CBR de la muestra inalterada de suelo en estado natural - Suelo - Buenaventura	56
Tabla 22. Datos del ensayo de RCI de muestra Shelby - Suelo - Buenaventura (a).....	57
Tabla 23. Datos del ensayo de RCI de muestras Shelby - Suelo - Buenaventura (b).	58
Tabla 24. Datos del ensayo de RCI de muestra compactada en laboratorio (Estado seco) - Suelo - Buenaventura	59
Tabla 25. Datos del ensayo de RCI de muestra compactada en laboratorio (Estado saturado) - Suelo - Buenaventura	59
Tabla 26. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (3%).....	60
Tabla 27. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (7%).....	61
Tabla 28. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (12%).....	61
Tabla 29. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (15%).....	62
Tabla 30. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (3%).....	64
Tabla 31. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (7%).....	65
Tabla 32. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (12%).....	66
Tabla 33. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (15%).....	67
Tabla 34. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (2%).....	70
Tabla 35. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (4%).....	71

Tabla 36. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (7%).....	71
Tabla 37. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (10%).....	72
Tabla 38. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (2%).	74
Tabla 39. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (4%).	75
Tabla 40. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (7%).	77
Tabla 41. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (10%).	78
Tabla 42. Datos del ensayo CBR de la mezcla de suelo con ceniza de concha de molusco (2%)	81

Índice de gráficas

Gráfica 1. Diagrama de flujo caracterización de los materiales y tipo de mezclas a analizar	22
Gráfica 2. Curva granulométrica - Ceniza de cáscara de coco.....	46
Gráfica 3. Curva granulométrica - Concha de molusco.	47
Gráfica 4. Curva granulométrica - Suelo - Buenaventura.	48
Gráfica 5. Diagrama de fluidez - Suelo - Buenaventura.....	51
Gráfica 6. Curva de compactación - Suelo - Buenaventura.....	52
Gráfica 7. Potencial de expansión de Lambe de la muestra en estado natural - Suelo - Buenaventura.....	53
Gráfica 8. Gráfica de Densidad seca vs CBR de la muestra en estado natural - Suelo - Buenaventura	55
Gráfica 9. Diagrama de esfuerzo vs deformación de muestra Shelby - Suelo - Buenaventura (a)	57
Gráfica 10. Diagrama de esfuerzo vs deformación de muestras Shelby - Suelo - Buenaventura (b).....	58
Gráfica 11. Diagrama de esfuerzo vs deformación de muestra compactada en laboratorio - Suelo - Buenaventura	59
Gráfica 12. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (3%).	60
Gráfica 13. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (7%).	61
Gráfica 14. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (12%). ...	62
Gráfica 15. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (15%). ...	62
Gráfica 16. Comparación de los límites de Atterberg para las mezclas de suelo con ceniza de cáscara de coco.....	63
Gráfica 17. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (3%).....	64
Gráfica 18. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (7%).....	65

Gráfica 19. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (12%).....	66
Gráfica 20. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (15%).....	67
Gráfica 21. Resistencia a la compresión inconfiada de suelo estabilizado con diferentes porcentajes de ceniza de cáscara de coco a 0, 7, 14 y 28 días - Estado seco.	69
Gráfica 22. Resistencia a la compresión inconfiada de suelo estabilizado con diferentes porcentajes de ceniza de cáscara de coco a 0, 7, 14 y 28 días - Estado saturado.....	69
Gráfica 23. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (2%)..	70
Gráfica 24. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (4%)..	71
Gráfica 25. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (7%)..	72
Gráfica 26. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (10%).	72
Gráfica 27. Comparación de los límites de Atterberg para las mezclas de suelo con ceniza de concha de molusco.	73
Gráfica 28. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (2%).....	75
Gráfica 29. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (4%).....	76
Gráfica 30. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (7%).....	77
Gráfica 31. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (10%).....	78
Gráfica 32. Resistencia a la compresión inconfiada de suelo estabilizado con diferentes porcentajes de ceniza de concha de molusco a 0, 7, 14 y 28 días - Estado seco.	80
Gráfica 33. Resistencia a la compresión inconfiada de suelo estabilizado con diferentes porcentajes de ceniza de concha de molusco a 0, 7, 14 y 28 días - Estado saturado.	80
Gráfica 34. Gráfica de Densidad seca vs CBR de la mezcla de suelo con ceniza de concha de molusco (2%).....	82

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Localización Distrito Buenaventura.	29
Ilustración 2. Ubicación del lugar de extracción de la muestra de suelo.	30
Ilustración 3. Técnicos realizando la excavación de la calicata	31
Ilustración 4. Muestras de suelo patrón natural extraído in situ.	31
Ilustración 5. Muestras alteradas mediante excavación en laboratorio.	31
Ilustración 6. Plantío de coco y coco tusado.	32
Ilustración 7. Muestras de ceniza de cáscara de coco	33
Ilustración 8. Proceso de selección, tratamiento y disposición concha de molusco. Zona rural Buenaventura.	33
Ilustración 9. Concha de molusco triturada.	34
Ilustración 10. Calcinación de la concha de molusco.	34
Ilustración 11. Compactación de la ceniza de concha de molusco para obtener material Pasa Tamiz N°200.	35
Ilustración 12. Mezcla de muestra de suelo con ceniza de cáscara de coco.	36
Ilustración 13. Ensayo de potencial de expansividad en el aparato de Lambe.	37
Ilustración 14. Ensayo de granulometría por tamizado.	37
Ilustración 15. Ensayo de granulometría por hidrómetro.	38
Ilustración 16. Ensayo de límite líquido.	39
Ilustración 17. Ensayo de gravedad específica.	40
Ilustración 18. Ensayo de Azul de Metileno.	41
Ilustración 19. Ensayo CBR en muestra inalterada.	43
Ilustración 20. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada.	44

Resumen

El presente estudio se describe como una investigación de tipo aplicada de enfoque cuantitativo, con un diseño de investigación experimental y un nivel de investigación correlacional, el cual se da por la baja capacidad portante y el alto costo de estabilizar suelos de subrasante en el distrito de Buenaventura. Se estableció como objetivo determinar cuál es el efecto que se genera con la adición de ceniza de cáscara de coco y ceniza de concha de molusco sobre un suelo arcilloso de alta plasticidad. Para su desarrollo se llevó a cabo un levantamiento de información documental, trabajo de campo y ensayos de laboratorio regulados por las especificaciones técnicas ASTM e INVIAS. Se estudiaron las propiedades y características del suelo, el cual se utilizó como patrón de interpretación de resultados finales en las pruebas mecánicas desarrolladas. Además, se evaluaron las proporciones de mezclas suelo CH + Estabilizantes para determinar los porcentajes a utilizar de ceniza de biomasa proveniente de la calcinación la cáscara (fibra) de coco y ceniza de cáscara de molusco (*Andara Mollusca*) y se estudió su comportamiento geotécnico, características físicas, mecánicas, susceptibilidad a la humedad, características de plasticidad, resistencia y trabajabilidad. Luego de analizar los resultados obtenidos, se pudo comprobar que la mezcla en estudio presenta un mejor comportamiento que el suelo en su estado natural, donde el porcentaje óptimo encontrado fue de 2% la ceniza de concha de molusco. La investigación concluye que la ceniza de cáscara de coco y ceniza de concha de molusco funcionan como materiales estabilizadores de suelo, siendo una técnica viable, económica y sostenible de realizar en la zona costera del país, para una posible ejecución a gran escala.

Abstract

The study was conducted in response to the low bearing capacity and high cost of stabilizing subgrade soils in the Buenaventura district. The aim of the study was to investigate the effectiveness of using coconut shell ash and mollusk shell ash as soil stabilizers for a high plasticity clay soil. The research study followed an applied quantitative methodology with an experimental research design and a correlational research level. A literature review, fieldwork, and laboratory tests were conducted according to ASTM and INVIAS technical specifications. The properties and characteristics of the soil were studied, and the geotechnical behavior, physical and mechanical characteristics, moisture susceptibility, plasticity characteristics, resistance, and workability of the soil were evaluated. Additionally, the proportions of soil-CH + stabilizers mixes were determined. The results of the study showed that the mixture of 2% mollusk shell ash performed better than the soil in its natural state. The mixture improved the soil's geotechnical behavior, making it a viable, economic, and sustainable technique for soil stabilization in the coastal zone of the country. The research study suggests that coconut shell ash and mollusk shell ash can function as effective soil stabilizing materials for high plasticity clay soil. In conclusion, the study showed that the addition of coconut shell ash and mollusk shell ash is an effective method for stabilizing high plasticity clay soil in the Buenaventura district. The research study contributes to the development of sustainable and cost-effective techniques for soil stabilization.

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El suelo de subrasante es el terreno natural o mejorado en donde se construyen las estructuras de pavimento, ya sea en afirmado o carpeta de rodadura, permitiendo así el libre transitar, con un grado de comodidad y seguridad adecuado para los usuarios.

Así lo afirman Estrada y Ventura (2019):

Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de la estructura del pavimento, que se colocará encima, en la etapa constructiva.

La subrasante deberá proporcionar las condiciones que garanticen la estabilidad de la estructura del pavimento y su conservación en el tiempo; cuando el suelo de subrasante presenta malas condiciones en los tramos viales a intervenir deben ser mejorados y estabilizados cumpliendo las especificaciones técnicas y las normas vigentes.

La red vial terciaria de Colombia consta de carreteras rurales que conectan comunidades y áreas remotas con los centros urbanos y los servicios básicos, como escuelas, colegios, hospitales y mercados. Además, Briceño Valero (2018) describe que el transporte de carga por carretera es el principal medio de movilización de mercancías en el país, convirtiéndolo en factor esencial para el desarrollo de la logística del país y de la economía, la cual está directamente asociada a las relaciones internacionales y del comercio entre regiones.

En Buenaventura, las vías terciarias son cruciales para el desarrollo económico y social de la región, puesto que esta es una ciudad portuaria en la costa Pacífica de Colombia, y es un puerto líder no solo en Colombia sino en Suramérica (Briceño Valero, 2018). Sin embargo, muchas de estas vías se encuentran en mal estado debido a la falta de mantenimiento y la falta de inversión, además de su complicada topografía, causan que el transporte terrestre en la región resulte costoso y limitado, afectando, en mayor medida, a aquellas poblaciones y habitantes de las zonas rurales del distrito, pues dependen en gran medida de la agricultura y la pesca para su sustento.

Las vías Secundarias y Terciarias juegan un papel importante en la integración nacional, regional y local, y además facilitan el acceso a la vida nacional de comunidades remotas y aisladas. Estas vías en su conjunto representan cerca del 92% del total de la malla vial nacional (Ospina Ovalle, 2016).

Los suelos están formados por diferentes composiciones, las que permiten clasificarlos como suelos estables o inestables. Dependiendo de esta clasificación, los suelos pueden llegar a generar inconvenientes a futuro en la estructura del pavimento; lo que además afectaría no solo la infraestructura vial, sino también las condiciones socioeconómicas del sector.

Buenaventura presenta problemas ambientales debido a las características del área natural donde está localizada. *"Su limitación principal es su localización en suelos arcillosos saturados de humedad que afectan especialmente la infraestructura vial, las redes y las grandes obras, al elevar los costos en su construcción y mantenimiento"* (Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial, Buenaventura, 2014). Así, en el terreno del distrito, predominan los suelos de tipo limos de alta plasticidad (MH) y arcillas de alta plasticidad (CH); suelos que se caracterizan por presentar una consistencia muy blanda y alta retención de agua, lo que los convierte en suelos con *"baja resistencia a la compresión, baja capacidad de soporte y elevada deformación plástica"* (Callejas-Cabrera et al., 2021). Estos suelos son propensos a la deformación y a la erosión debido a su baja capacidad de soporte, por lo que se consideran suelos inestables y poco confiables a la hora de ser considerados como suelos de subrasante y, por lo tanto, es necesario realizar procesos de mejoramiento.

Buenaventura, como muchas otras zonas costeras de Colombia, se enfrenta al desafío de manejar los residuos generados por sus actividades comerciales y pesqueras. Según un estudio realizado por la Alcaldía Distrital de Buenaventura (2021), la generación de residuos sólidos en Buenaventura se estima en aproximadamente 6.700 toneladas por mes. Entre los residuos más comunes generados, se encuentran el coco y la concha de molusco (Andara Mollusca).

El coco, en Colombia, es producido a razón de 7,2 toneladas por hectárea, generando aproximadamente 145.000 toneladas al año (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural,

2020). Este producto es utilizado comúnmente en la gastronomía local siendo la sustancia líquida interna la que se consume, además de ser utilizada para la producción de aceite y leche de coco, dejando como desperdicio el resto del coco (Garófalo y Hernández, 2018). Dichos residuos sólidos que se generan son difíciles de desechar y, tal como lo afirman Garófalo y Hernández (2018), la cáscara tarda 100 años en biodegradarse mientras que su fibra de 20 a 30 años.

Por otro lado, de la fauna marina iberoamericana, se han descrito e identificado 1.955 especies, de las cuales comúnmente son capturadas en la pesca artesanal, especies como pargos, corvinas, sierras, cojinúas y otros peces; y crustáceos, principalmente camarones marinos, así como moluscos y poliquetos (Barragán Muñoz, 2010). Los residuos sólidos obtenidos de estos, al igual que la cáscara de coco, son difíciles de desechar, ya que no se descomponen fácilmente y también tardan años en degradarse.

Más del 45% del territorio colombiano corresponde a zonas marítimas, teniendo una longitud de hasta 3.200 kilómetros de línea costera en el Océano Pacífico y en el mar Caribe, incluyendo las áreas insulares. Estas dos costas poseen una intrincada geomorfología y una variedad ecosistemas como arrecifes coralinos, manglares, litorales rocosos, playas arenosas y fondos sedimentarios, con una temperatura cálida relativamente constante (Barragán Muñoz, 2010).

Asociado a estas condiciones, tal como afirma el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andrés" (INVEMAR, 2010); Colombia cuenta con una gran biodiversidad marina entre la cual se encuentra la de bivalvos, con el registro de 352 especies en el Océano Pacífico y 315 en el mar Caribe. De estas especies, alrededor de 40 poseen características para ser consideradas de interés comercial, no obstante, solo unas cuantas, las de mayor abundancia, son conocidas y comercializadas bajo los nombres de almejas, chipi-chipi, ostras, pianguas y scallops.

Es así que, el objetivo de este proyecto consiste en implementar una de las soluciones que permitan mejorar la infraestructura vial del distrito, lo que a su vez conlleva en la mejora de la economía de este. De acuerdo con lo expuesto en la problemática, es necesario buscar alternativas que sean amigables con el medio ambiente y que ayuden a optimizar los recursos disponibles, debido a la contaminación a la que se enfrenta

actualmente el distrito. Por lo tanto, se tuvieron en cuenta investigaciones que han logrado solventar la problemática de manera eficiente y que sean adecuadas para implementar en el contexto actual mediante la aplicación de algunos de los residuos más comunes generados en la región.

1.2. Justificación

El presente trabajo de investigación favorecerá el desarrollo, mantenimiento y/o mejoramiento de las vías no pavimentadas de los barrios y las vías terciarias del distrito de Buenaventura con la adición de ceniza de cascara de coco y ceniza de concha de molusco (*Andara Mollusca*), aprovechando los residuos que se generan durante la explotación industrial del coco, la pesca y/o captura de moluscos en la zona de manglares; donde a su vez, se contribuye al cuidado del medio ambiente.

Con la mejora de las subrasantes de las vías barriales, terciarias y caminos vecinales se podrán mejorar el acceso a los barrios, comunidades rurales, permitiendo a los campesinos mejorar el acceso a las comunidades, mejora la calidad de vida, y la posibilidad de comercializar sus productos e impulsar el turismo en la región.

La utilización de residuos agrícolas como materiales estabilizantes de suelos es una práctica que ha sido probada en diferentes países, y ha demostrado ser efectiva para mejorar la calidad del suelo y aumentar la resistencia de los suelos de subrasante (Hoyle Vega & Rodriguez Lopez, 2019; Ikeagwuani, 2019; Kamaruddin et al., 2020; Moghimi et al., 2022; Patel & Mishra, 2018; Sánchez Pérez & Terrones Garcia, 2020; Subia Carrillo, 2020; Vargas et al., 2020). La ceniza de cáscara de coco y la ceniza de concha de molusco son materiales potenciales en la estabilización de suelos. De acuerdo con Ikeagwuani (2019), la ceniza de cáscara de coco contiene elementos como sílice, calcio y magnesio, además de hierro, aluminio y sodio en distintas proporciones, los cuales ayudan a mejorar la capacidad portante, la compresibilidad y la resistencia al corte de los suelos tratados con este material.

Por su parte, la ceniza de concha de molusco contiene principalmente calcio, magnesio y sílice, así como elementos en menor proporción como hierro y aluminio (Sudjianto et al., 2021), los cuales, de igual manera, ayudan a mejorar la estabilidad y la resistencia al corte de los suelos, así como también ayudan en la reducción de la expansión y contracción de estos.

De esta manera, se puede afirmar que, la utilización de residuos como materiales estabilizantes de suelos puede ser una alternativa sostenible y rentable para mejorar las vías terciarias en Colombia. Esta práctica puede ayudar a la economía del país al generar

empleo y reducir la dependencia de materiales importados. Por lo tanto, es importante fomentar la investigación y la implementación de esta práctica en Colombia para mejorar la calidad de las vías terciarias y contribuir al desarrollo sostenible del país.

Por lo tanto, el presente proyecto cobra gran importancia debido a que se busca aprovechar los residuos generados por la producción industrial en beneficio del mejoramiento de los suelos. Además, la utilización de estos residuos puede brindar importantes beneficios para la red vial terciaria, lo que implicaría una mejora en la calidad de las carreteras y en la reducción de los costos de mantenimiento. Además, el uso de residuos de manera sostenible y responsable contribuiría a disminuir la contaminación y a promover prácticas más amigables con el medio ambiente.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de un suelo arcilloso de alta plasticidad, característico del distrito de Buenaventura, estabilizado utilizando ceniza de cascara de coco y concha triturada de molusco (Andara Mollusca).

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Identificar y caracterizar las propiedades de un suelo característico del distrito de Buenaventura
- ✓ Caracterizar la ceniza de cascara de coco y la ceniza de concha molida de Molusco (Andara Mollusca).
- ✓ Evaluar el comportamiento físico y mecánico de suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) estabilizado con diferentes proporciones de ceniza de cascara de coco y ceniza de concha molida de Molusco (Andara Mollusca).

3. Marco teórico

3.1. Conceptos básicos

- **Suelos cohesivos:**

Tienen la capacidad de sufrir cambios volumétricos a causa de la humedad, esto debido a que contienen pequeñas partículas y arcilla para que el suelo se cohesione o adhiera a sí mismo (Martínez, 2019). Sus propiedades mecánicas son poco confiables, su utilización en construcción es poco frecuente y en su mayoría, requieren de procesos de estabilización para conferirle resistencia.

- **Estabilización de suelos:**

Sánchez y Terrones (2020) concluyeron que:

El suelo es la base donde todo proyecto de ingeniería se establece, cuando presentan características adversas como alta plasticidad, baja resistencia, estos deben ser mejorados y estabilizados, para ello es conveniente hacer un análisis del componente que tenga mejores resultados en el suelo y ofrezca un rentabilidad al proyecto.

- **Estabilización mecánica de suelos:**

Rivera et al. (2020) afirman que:

Consiste en compactar el suelo de forma estática o dinámica para aumentar su densidad, su resistencia mecánica, disminuir su porosidad y su permeabilidad. Se puede llevar a cabo mediante compactación. Los objetivos ingenieriles de dicho procedimiento son principalmente a) aumentar su capacidad portante, b) disminuir el asentamiento de las estructuras, c) controlar cambios volumétricos indeseables, d) reducir la permeabilidad al agua, y e) aumentar la estabilidad de los taludes

- **Estabilización física de suelos:**

Rivera et al. (2020) determinaron que:

Consiste en modificar las propiedades de los suelos mediante la intervención en algunas de sus propiedades para aportarle características estructurales nuevas. Entre los

procedimientos físicos se encuentran el uso de los materiales denominados geo sintéticos, tales como los geotextiles, las geomallas, las geomembranas, el geo compuesto y las geo celdas

- **Estabilización química de suelos:**

Rivera et al. (2020) describen que:

Se puede utilizar en todos los tipos de suelos para el mejoramiento de sus propiedades geotécnicas, cambiando las propiedades fisicoquímicas iniciales del suelo nativo con el objetivo de mitigar algunos problemas tales como la inestabilidad volumétrica o incrementar algunas de sus propiedades como la resistencia y durabilidad. Este tipo de estabilización incluye la utilización de una amplia gama de materiales, entre los cuales el cemento y la cal han sido los más convencionales; sin embargo, otros productos como sales y residuos o subproductos industriales también han sido considerados en la estabilización de suelos para construcción de carreteras

3.2. Caracterización de los residuos agrícolas

3.2.1. Cáscara de coco

La cáscara de coco al no ser consumida y no tener un uso específico podría ocasionar problemas ambientales debido a que su descomposición en la naturaleza bajo condiciones húmedas, ya que la fibra puede demorar entre 20 a 30 años en descomponerse mientras que su cáscara puede superar los 100 años (Garófalo y Hernández 2018).

Ahora bien, los estudios realizados con la cáscara de coco han determinado que, al calcinar dicho insumo, se adquieren compuestos químicos los cuales pueden ser muy beneficiosos en la estabilización de suelos. Así lo describe Hinostroza (2020), el cual afirma que la temperatura adecuada es entre 500°C y 700°, para hornos industriales, a manera que al ser un material cementante y con esas temperaturas se vuelve puzolánico al ser probadas en probetas. Si la temperatura se sobrepasa los niveles de puzolánicas y otros elementos se pierden.

Algunas de las caracterizaciones químicas realizadas en anteriores investigaciones se observan en las Tabla 1 Tabla 2 Tabla 3.

Tabla 1. Composición química de ceniza de cáscara de coco (CCC).

Tabla 1.1. Propiedades fisicoquímicas e IAR de CCCs.

Propiedades	Awal 1997	Sata 2006	Jaturapitakkul 2007	Chindaprasirt 2007	Rukzon 2008
Cenizas de:	A	B	B	A,B	B
Temperatura de quemado (°C)	600	-----	800-1000	-----	800-1000
Densidad (g/cm ³)	2.22	2.33	2.43	2.43	2.25
Ret. en malla No. 325	-----	1.5	1.0	1.0	1-3
Partícula d ₅₀ (µm)	-----	10.1	7.4	8.0	7.0
Fineza (cm ² /g)	5,190	12,435	-----	-----	11,800
Composición química					
SiO ₂	43.6	65.30	57.7	57.8	63.6
Al ₂ O ₃	11.4	2.56	4.5	4.6	1.6
Fe ₂ O ₃	4.7	1.98	3.3	3.3	1.4
CaO	8.4	6.03	6.5	6.6	7.6
K ₂ O	3.5	5.72	8.2	8.3	6.9
MgO	4.8	3.08	4.2	4.2	3.9
Na ₂ O	0.39	0.36	0.5	0.5	0.1
SO ₃	2.8	0.47	0.2	0.3	0.2
LOI	18.00	10.05	10.50	10.10	9.60
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	59.7	69.84	65.5	65.7	66.6
IAR a 28 días, 20% de sustitución	115 % (mortero)	105% (mortero con fibras)	99% (concreto)	92% (concreto)	102% (mortero)

A: Quema de frutos de coco vacíos en fábricas productoras de aceite de palma.

B: Quema de frutos de coco vacíos en plantas generadoras de energía eléctrica.

Fuente: Hernández Toledo (2010)

Tabla 2. Composición química de ceniza de cáscara de coco (CSA) y ceniza de fibra de coco (CHA).

Table 3 Oxide compositions (%) of the soil, coconut shell ash (CSA), coconut husk ash (CHA) and lime

Element oxide (%)	Soil	CSA	CHA	Lime
Silica (SiO ₂)	41.45	39.02	23.42	-
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	21.34	0.08	2.56	0.1979
Alumina (Al ₂ O ₃)	30.41	13.98	3.01	12.1905
Phosphorus oxide (P ₂ O ₅)	0.01	2.35	0.02	-
Sulphur dioxide (SO ₂)	-	1.51	0.53	-
Soda (Na ₂ O)	0.06	-	9.20	-
Potash (K ₂ O)	0.15	27.24	30.61	-
Lime (CaO)	1.16	1.91	0.03	80.4695
Magnesia (MgO)	0.06	3.00	0.02	6.7915
Titanium oxide (TiO ₂)	1.21	0.05	0.01	-
Magnesium oxide (MnO)	0.01	0.08	0.01	-
Zinc oxide (ZnO)	-	0.02	0.01	-
Loss on ignition (LOI)	4.14	10.76	30.57	-
(P ₂ O ₃)	-	-	-	0.2541
(SrO)	-	-	-	0.383
(MoO)	-	-	-	0.0072
(Ag ₂ O ₃)	-	-	-	0.0042
(CdO)	-	-	-	0.0197
(SbO)	-	-	-	0.0077
(BaO)	-	-	-	0.0191
(HfO)	-	-	-	0.0003

Fuente: Ikeagwuani (2019)

Tabla 3. Composición química de carbón de cáscara de coco.

Table 1. Content charcoal chemical at Karanganyar[14].

No	Chemical Elements	Result Test (%)
1	Al ₂ O ₃	18.6831
2	CaO	5.4185
3	Fe ₂ O ₃	2.3993
4	MgO	2.7813
5	SiO ₂	28.6142

Fuente: Sahara et al. (2020)

3.2.2. Concha de molusco

Las conchas de molusco se caracterizan por su dureza y resistencia, ya que son protectores del molusco que las poseen. Sin embargo, la industria pesquera ha generado que dichas conchas se conviertan en un residuo industrial, el cual tarda de 50 a 100 años en degradarse, por lo que son una fuente de contaminación alta, sobre todo en las zonas costeras (Ramírez Malla, 2020).

Ramírez Malla (2020) afirma que, el CaO es un compuesto químico de mucha resistencia presentando características similares a las del cemento, cal, hidróxido de calcio, entre otros y esto hace que se pueda intuir que puede servir como estabilizador de suelo mejorando la capacidad de relación de soporte CBR. Las conchas por sus características y propiedades físico-mecánicas son muy importantes en el tema de resistencia por su composición CaCO₃ por ello el efecto de estas conchas ante efectos de erosión son muy eficientes y garantizan durabilidad.

Por lo tanto, para optimizar dicho insumo, se realizan procesos de calcinación, tal como lo afirman Ok et al. (2010), calcinar el polvo de concha de ostra a 900°C durante 4 horas descompone completamente el CaCO₃, convirtiéndose en CaO.

Es por ello que las conchas de molusco pueden ser usados como material granular fino para estabilización de suelos y contribuir con el mejoramiento de la resistencia del suelo.

Algunas de las caracterizaciones químicas realizadas en anteriores investigaciones se observan en las Tabla 4 Tabla 5 Tabla 6.

Tabla 4. Composición química de conchas de mar.

Element	Heating temperature	
	500 °C	700 °C
SiO ₂	0.24	0.15
Al ₂ O ₃	0.04	0.06
Fe ₂ O ₃	0.37	0.46
CaO	54.43	55.1
MgO	0.85	0.1
Na ₂ O	0.00	0.1
K ₂ O	0.01	0.01
TiO ₂	0.09	0.09
MnO	0.06	0.07
P ₂ O ₅	0.02	0.02
SO ₃	0.08	0.00
H ₂ O	0.04	0.21
HD	34.76	43.22

Fuente: Sudjianto et al. (2021)

Tabla 5. Composición química de ceniza de concha de mar (Sea Shell ash - SSA)

Table 2 Chemical composition of soil and SSA

Chemical composition	Soil (% by total weight)	SSA (% by total weight)
SiO ₂	54.41	1.29
Al ₂ O ₃	18.42	0.67
Fe ₂ O ₃	8.62	0.42
CaO	1.83	94.74
MgO	2.73	1.23
Na ₂ O	1	0.46
K ₂ O	2.23	–
MnO	0.2	–
SrO	–	0.3
LOI	8.63	0.89

Fuente: Moghimi et al. (2022)

Tabla 6. Composición química de ceniza de concha de Berberecho (Periwinkle Shell ash - PSA).

Table 3 Chemical compositions of the lateritic soil, lime and PSA

Oxide composition	Chemical composition by weight (%)		
	Lateritic soil	Lime	PSA
Al ₂ O ₃	0.034	0.65	9.75
CaO	0.37	55.4	43.00
SiO ₂	38.2	0.54	31.52
K ₂ O	–	0.46	0.4
SO ₃	0.78	0.03	0.07
Fe ₂ O ₃	26.3	0.10	9.68
Na ₂ O	–	0.04	0.28
MnO	0.034	–	0.01
MgO	–	0.06	0.75
V ₂ O ₅	0.21	–	–
TiO ₂	0.65	–	0.024
Cr ₂ O ₃	0.21	–	–
ZnO	0.001	–	0.01
LOI	5.2	35	4.3

Fuente: Etim et al. (2022)

3.3. Investigaciones previas

Hernández Toledo (2010); realizó una investigación para evaluar el efecto de la adición de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento. Para ello, utilizó ceniza de bagazo de caña como aditivo y evaluó las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas y midieron la velocidad de corrosión utilizando técnicas electroquímicas. Los resultados permitieron demostrar que la adición de la ceniza mejoró las propiedades mecánicas y disminuyó la velocidad de corrosión del ferrocemento. Además, observó que el tiempo de curado tuvo un efecto significativo en la corrosión del ferrocemento, por lo que se convierte necesario un tiempo mínimo de curado para lograr una adecuada protección contra la corrosión.

Castañeda (2017); realizó un análisis de la concha de abanico triturada para evaluar su potencial uso como agregado en concretos. Para ello, se obtuvieron análisis granulométricos de la concha de abanico triturada y se compararon con los requisitos de la norma ASTM C33 para agregados gruesos utilizados en concretos. Los resultados mostraron que esta cumplía con los requisitos de granulometría y, además, se encontró que la adición de hasta 25% de concha de abanico triturada como reemplazo parcial del agregado grueso no afectaba significativamente su resistencia a la compresión. En

conclusión, el estudio demostró que la concha de abanico triturada podría ser utilizada como un sustituto viable y sostenible del agregado grueso en concretos.

Garófalo y Hernández (2018); en su documento, buscaban investigar la factibilidad de utilizar la cáscara de coco como materia prima para la producción de tableros aglomerados y carbón activado. Para ello, recolectaron muestras de cáscara de coco de diferentes zonas de la región de Lambayeque, Perú, y realizaron análisis físicos y químicos para determinar su composición. Además, realizaron ensayos de laboratorio para evaluar la resistencia mecánica y las propiedades físicas de tableros aglomerados producidos utilizando diferentes porcentajes de coco y adhesivos. Por otro lado, en la producción de carbón activado se realizó un proceso de carbonización de la cáscara de coco, seguido de activación química con ácido fosfórico, así, evaluaron las propiedades físicas y químicas del carbón activado resultante, incluyendo la capacidad de adsorción de sustancias orgánicas.

Espinoza y Honores (2018); investigaron el uso de las conchas de abanico y cenizas de carbón como estabilizadores de suelos arcillosos con fines de pavimentación. Llevaron a cabo ensayos de laboratorio para evaluar las propiedades físicas y mecánica de los suelos estabilizados, incluyendo la densidad, humedad óptima, resistencia a la compresión y resistencia al corte. Los resultados demostraron que la adición de concha de abanico y cenizas de carbón mejoraban las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, donde, la combinación óptima de estabilizantes era del 25% de conchas de abanico y de cenizas de carbón, lo que resultó en una resistencia a la compresión máxima del suelo estabilizado. Así, concluyeron que este enfoque puede ser una solución sostenible y rentable para la construcción de carreteras.

Patel y Mishra (2018); realizaron una investigación referente a la estabilización de suelos de subrasante utilizando polvo de concha de mar. Para ello, utilizaron diferentes porcentajes de polvo de concha de mar para ser mezclados con el suelo de subrasante y, posteriormente, se evaluaron sus propiedades mediante ensayos como resistencia a la compresión inconfiada, módulo dinámico y ángulo de fricción para evaluar la efectividad de la estabilización. Los resultados mostraron que, con el aumento del polvo de concha de mar, la densidad máxima seca aumenta mientras que la humedad óptima

disminuye, convirtiendo al suelo en un suelo más denso y resistente. Así, determinaron que el porcentaje de adición óptimo es de 15% y concluyen que los contratistas de carreteras y diseñadores de pavimentos pueden utilizar dicho porcentaje de polvo de concha de mar para estabilizar suelos, ya que es atractivo y respalda la mejora sostenible en el desarrollo de carreteras.

Estrada y Ventura (2019); realizaron un estudio de la efectividad de la ceniza de concha de abanico como un material de estabilización de la subrasante del suelo para la construcción de carreteras en la región de La Libertad, Perú. Se realizaron pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo sin tratar y, además, se llevaron a cabo ensayos de compactación, CBR, de expansión utilizando diferentes porcentajes de ceniza de concha de abanico. Los resultados del estudio mostraron que la adición de la ceniza mejoró la capacidad portante del suelo y redujo su potencial de expansión. Además, encontraron que el porcentaje óptimo de adición de ceniza de concha de abanico fue del 8% para obtener los resultados deseados.

Cobos Molina et al. (2019); evaluaron el comportamiento geotécnico de suelos de origen volcánico estabilizados con ceniza proveniente cáscara de coco y cisco de café; proponiendo una investigación que permita la utilización de este tipo de suelos con un proceso de estabilización a través de la adición de ceniza de biomasa proveniente de la calcinación del cisco de café y la cáscara (capacho) de coco. Evaluaron el comportamiento geotécnico, características físicas, mecánicas, susceptibilidad a la humedad, características de plasticidad, resistencia y trabajabilidad.

Los resultados obtenidos permitieron demostrar cambios importantes en sus propiedades mecánicas, en el momento de estabilizar el suelo, , indicando que el suelo simplemente consolidado no tiene la capacidad portante suficiente para resistir una carga determinada pero que al cambiar el método estabilizador hace que aumente su compactación y mejore rápidamente su capacidad portante. Se determinó que la ceniza de CCF y CCO funcionan como material conglomerante que permite potenciar las propiedades de un suelo, razón por la cual dentro de las tomas hechas se ve que al adicionarle el 15% de biomasa se logran porcentajes de compactación promedio cercanos y superiores al 100%. El suelo en ninguna circunstancia debe reducir su

contenido de humedad por debajo del 7%, ya que se alteran considerablemente sus propiedades mecánicas. El uso de suelos de origen volcánico con adiciones de biomasa puede ser una alternativa que permita generar mejoramiento de subrasantes a un costo menor.

Ikeagwuani (2019); llevó a cabo un estudio para evaluar la efectividad de la ceniza de cáscara de coco y la ceniza de fibra de coco como materiales de adición en la estabilización de suelo laterítico con cal de una cantera en Nigeria como material de subbase en carreteras. Se realizaron ensayos para determinar sus propiedades físicas y mecánicas tanto al suelo natural como al suelo estabilizado con cal y ceniza. Los resultados del estudio mostraron que la adición de dichas cenizas mejoró significativamente las propiedades mecánicas del suelo estabilizado con cal, estas fueron tanto la resistencia a la compresión como la resistencia a la flexión. Además, determinaron que la ceniza de cáscara de coco es más efectiva que la ceniza de fibra de coco, pues se determinaron porcentajes óptimos de 4% de ceniza de cáscara de coco y 4% de cal, mientras que para la ceniza de fibra de coco fue del 16% con un 4% de cal. Sin embargo, ambas fueron capaces de reducir la expansión del suelo laterítico.

Nujid et al. (2019); presentaron un estudio sobre la estabilización de suelos marinos utilizando polvo de concha de berberecho y la relación entre el índice de soporte de California (CBR) y el índice de plasticidad del suelo. Para ello, utilizaron diferentes contenidos de polvo para ser agregados al suelo y se realizaron ensayos CBR y de índice de plasticidad. Los resultados dieron a conocer que el polvo de concha de berberecho mejoró significativamente tanto el CBR como el índice de plasticidad del suelo marino. Además, se encontró que existe una fuerte correlación entre el CBR y el índice de plasticidad del suelo.

Subia Carrillo, (2020); tuvieron como objetivo general determinar de qué manera influye en el análisis de la subrasante usando cenizas de coco para mejorar sus propiedades mecánicas y cuyos objetivos específicos fueron analizar, determinar y evaluar qué efecto causa el uso de las cenizas de coco en diferentes porcentajes en la capacidad portante, la resistencia y la permeabilidad en la sub rasante, llegando a la conclusión que mediante los ensayos realizados de análisis granulométrico se llegó a determinar según el sistema

AASHTO que la clasificación A-1-b (0), es de un material de arena gruesa de suelo bien graduado y según el SUCS es un tipo de suelo SM es decir arena limosa. Donde se concluyó que con la adición de la ceniza de coco al 5 %, 10 %, y 15% aumenta y mejora el CBR al 100 % es decir 43.8%, 49.1% y 58.9% respectivamente, teniendo como recomendación el uso de cenizas de coco para el mejoramiento de la subrasante entre la cuadra 8 y 9 de la Av. Canta Callao en S.M.P.

Ramírez Malla (2020); en la investigación realizada tuvo como objetivo determinar de qué manera la adición de valvas de concha de abanico en la subrasante influye en la estabilización de suelos blandos. El tipo de investigación aplicada, diseño cuasiexperimental y el tipo de muestreo es no probabilístico. Se empleó valva de concha de abanico (V.C.A) proveniente del distrito de Ancón, se realizaron ensayos granulométrico, clasificación de suelo método, Proctor Modificado y CBR; con la adición de distintos porcentajes de V.C.A. Así, los resultados mostraron que el suelo mejoró considerablemente con la adición de las valvas de concha de abanico, mejorando la capacidad del suelo de retener agua, reduciendo la expansión y contracción del suelo. Además, se encontró que el porcentaje óptimo de adición es del 60% en peso seco del suelo.

Hinostroza (2020); consideró como objetivo principal determinar de qué manera influye la ceniza de cascara de coco y la ceniza de caña de azúcar en el mejoramiento de la subrasante. Se tuvieron en cuenta los ensayos de laboratorio como; clasificación de suelo (SUCS y AASHTO), granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, expansión y CBR mediante la aplicación de distintas dosis de cenizas. El análisis de los resultados permitió determinar que, con ceniza de cascara de coco se obtuvo una mayor densidad para una dosificación del 3% y para el caso de ceniza de bagazo de caña, la mayor densidad se obtuvo con la dosificación del 35%. Se concluye que al adicionarle cenizas de cascara de coco y cenizas de caña de azúcar mejoran la resistencia de la subrasante, la expansión y CBR cada uno con valores que llegan alcanzar lo esperado.

Apac Jesus (2020); El informe de investigación evalúa el uso de Valva de concha de abanico (VCA) como estabilizador mecánico de suelos blandos para la subrasante en la provincia de Cañete. Algunos reglamentos como Florida Department of Transportation

Standard Specifications for Road and Bridge Construction y Orange County Utilities Máster CIP Technical Specifications, especifican el uso de las conchas de abanico de mar como estabilizador de base y subbase. Mediante el método cuantitativo experimental, se dieron 3 mezclas por combinación que cumplieran con el uso granulométrico de la norma ASTM D-1241 y se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Estos ensayos se realizaron según NTP, obteniendo un suelo SUCS SM (arena limosa), donde su clasificación de suelo AASHTO A-1-b (0), incluye a la arena gruesa con o sin un ligante de suelo bien graduado. Donde la resistencia de la mezcla al 55% del material, es de 4.36 kg/cm². Llegando a la conclusión que las adiciones del 15%, 35% y 55%, aumentan su capacidad portante, obteniendo un CBR de 43.2%, 49.3% y 58.3% respectivamente, siendo estos valores mayores al 6%. Por lo tanto, las VCA cumplen la norma ASTM C977 como material estabilizador.

Sahara et al. (2020); en su investigación, analizaron el polvo de carbón de cáscara de coco en la estabilización de suelos, de tal manera que se permita aumentar la resistencia al corte del suelo para que no se convierta en un residuo. Las pruebas realizadas fueron de granulometría, límites de consistencia, gravedad específica, compactación y prueba de corte directo. Así, los resultados demostraron que para el suelo arcilloso con un 15% de polvo de carbón de cáscara de coco aumentó la resistencia al corte de 26.844 kN/m² a 59.845 kN/m².

Sánchez y Terrones (2020) consideraron como objetivo evaluar el efecto de la estabilización de suelos utilizando híbrido de polvo de concha de abanico y vidrio reciclado, en el CP Huacacorrall en el año 2021. La investigación se fundamenta en la adición del estabilizante híbrido compuesto por conchas de abanico y vidrio reciclado, siendo el objetivo evaluar el efecto del híbrido en la estabilización de suelos, de la trocha carrozable del CP Huacacorrall, determinando la proporción óptima, en el proceso de estudio. Según el objetivo y la naturaleza del estudio es experimental, de nivel cuantitativo, diseño experimental y aplicativo. La investigación tiene una muestra constituida por 04 muestras, correspondiente a 04 tratamientos de estímulo creciente 0%, 10%, 15% y 20% de adición en peso del híbrido conchavidrio (HCV). Se usó la técnica de análisis documental, observación en laboratorio, interpretando los resultados en guías técnicas. La investigación concluye que la influencia del puzolánico de concha

de abanico y vidrio reciclado, en la máxima densidad seca y CBR, logra mejorarlo considerablemente, ya que, de acuerdo con los resultados, se determinó que hay mejora en la capacidad de soporte del suelo convirtiéndolo en un suelo apto para ser usado como subrasante.

El híbrido estabilizante por el polvo de concha de abanico y vidrio reciclado ha estabilizado el suelo arcilloso analizado de la trocha carrozable del CP Huacacorrall. Los materiales alternativos, cuentan con potenciales precursores puzolánico, los cuales fueron activados por medios térmicos (concha de abanico) y mecánicos (concha de abanico y vidrio reciclando), reportando en óxidos: concha de abanico en un 90% CaO y 39.08% SiO₂. El estabilizante híbrido ha elevado la máxima densidad seca en suelos arcillosos, en los grupos experimentales (10%, 15% y 20%), siendo los resultados de 1.748, 1.787 y 1.807 g/cm³, superando los valores del grupo control (0%) 1.71 g/cm³. Se observó igualmente en el CBR (10%, 15% y 20%), resultados positivos de adición: 11, 15 y 20, superando los valores del grupo control (0%) 4.9. De este análisis el suelo ha sido estabilizado en los grupos experimentales. Los valores óptimos de adición del híbrido estabilizante se consideran 20%, pues alcanza resultados alentadores y máximos en el ensayo de Proctor modificado: 1.807 g/cm³ y CBR: 20%

Ramos y Trauco (2020); realizaron un documento, el cual se enfoca en el uso de la ceniza de concha de abanico como estabilizador de subrasante para la pavimentación de carreteras en el asentamiento Dunas del Sur, en Nuevo Chimbote (Perú). Los resultados mostraron que la ceniza de concha de abanico puede mejorar significativamente las propiedades de la subrasante del pavimento, mejorando la resistencia a la compresión y reduciendo la expansión y contracción del suelo, lo cual disminuye considerablemente la formación de baches y fisuras en la carretera. De esta manera, concluyen que la ceniza de concha de abanico es un material efectivo para la estabilización de la subrasante del pavimento y puede mejorar su resistencia y durabilidad, además, se convierte en una alternativa sostenible y económicamente viable para la construcción de carreteras en áreas donde se encuentran abundantes residuos de concha de abanico. Además, determinaron que las cenizas de conchas de abanico poseen un alto porcentaje de cal, siendo del 80% y que, el porcentaje óptimo añadido fue del 11%.

Nitish et al. (2021); presentan un estudio sobre la estabilización de suelos utilizando subproductos industriales y fibra de coco. En el procedimiento llevado a cabo, utilizaron diferentes combinaciones de subproductos industriales, tales como cenizas volantes y escorias de alto horno, junto con fibra de coco para estabilizar el suelo. Realizaron pruebas de resistencia a la compresión, CBR, entre otros. Los resultados mostraron que las combinaciones de los subproductos con la fibra de coco obtuvieron valores favorables, dado que aumentó la resistencia a la compresión y la absorción de agua disminuyó.

Andriani y Permana (2021) realizaron un estudio enfocado en el uso de carbón de cáscara de coco para mejorar la capacidad de carga de una arcilla que se pretendía usar como subrasante. Los resultados mostraron que la adición de dicho carbón mejoró las propiedades del suelo, convirtiéndolo en un suelo más resistente. Se encontró que el porcentaje de adición óptimo era del 4% para lograr la capacidad de soporte máxima. Así, concluyeron que el carbón de cáscara de coco es un aditivo efectivo para mejorar la duración de una carretera.

Ofuyatan et al. (2021); realizaron un estudio que se enfoca en investigar el efecto de la ceniza de concha de caracol en suelos arcillosos negros (Black Cotton Soil). El objetivo del estudio fue determinar cómo la ceniza de concha de caracol influye en las propiedades del suelo para así, mejorar su calidad y rendimiento. Los resultados mostraron que la adición de concha de caracol al suelo arcilloso mejoró significativamente la capacidad de retención de agua, la gravedad específica, la resistencia a la compresión y la capacidad de soporte de carga del suelo. Además, se encontró que, de igual manera, aumentó el contenido de nutrientes del suelo, lo que podría mejorar el rendimiento de los cultivos. Se encontró que el porcentaje óptimo de adición es del 16%, el cual proporcionó los mejores resultados en las propiedades del suelo. Así, concluyeron que esta investigación demostró los beneficios que puede tener la adición de ceniza de concha de caracol en la agricultura y la industria de la construcción, especialmente en regiones donde el suelo arcilloso es común.

Sudjiyanto et al. (2021); realizaron una investigación que tuvo como objetivo estabilizar un suelo arcilloso expansivo, mediante la utilización de ceniza de conchas de mar. Para ello,

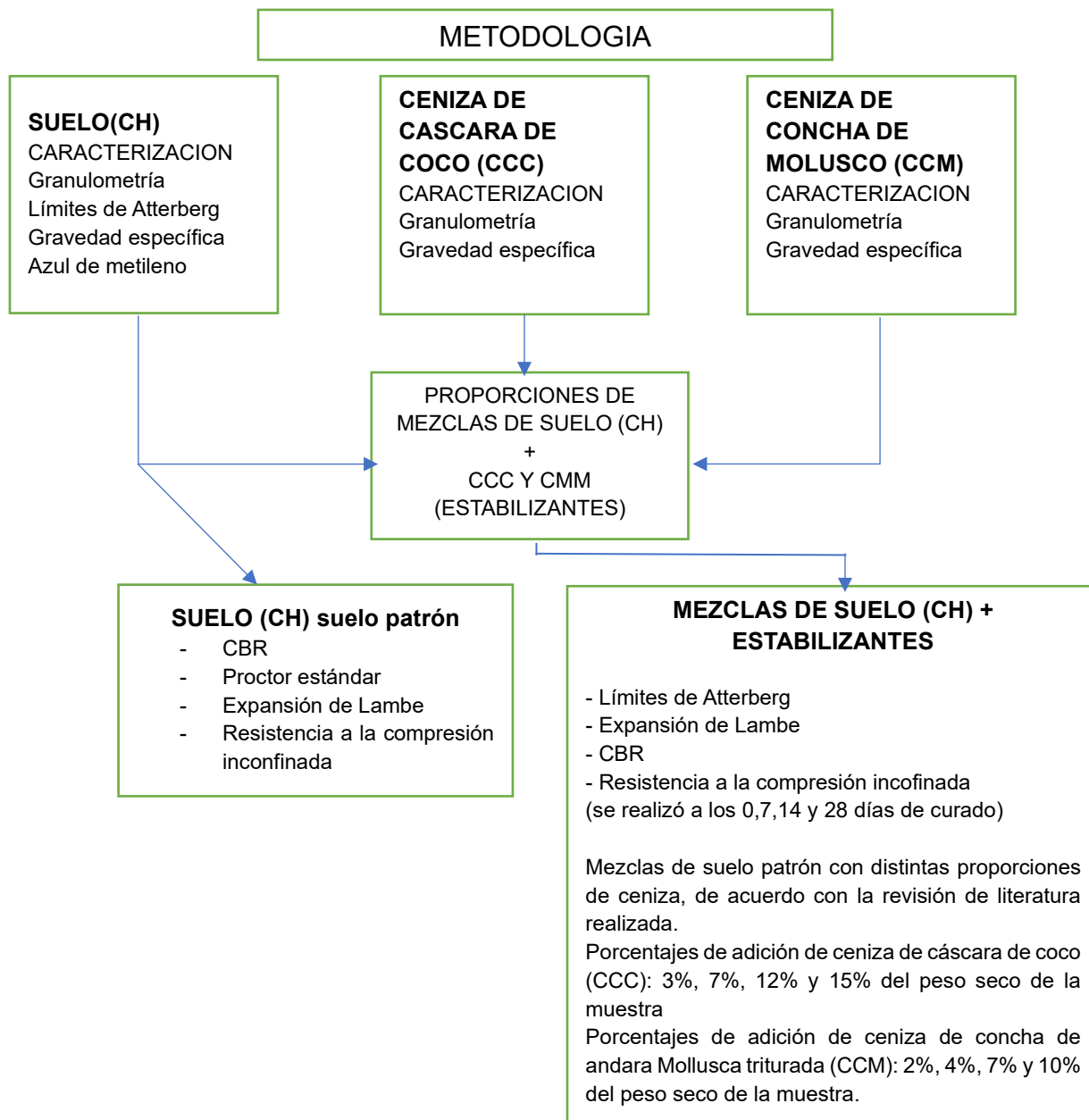
se llevaron a cabo ensayos de laboratorio como Proctor, pruebas químicas (prueba química del suelo, prueba mineral del suelo), pruebas físicas (humedad del suelo, límites de Atterberg) y pruebas mecánicas (Compresión inconfiada, prueba de compactación, prueba de expansión). Los resultados mostraron que la adición de ceniza de concha puede reducir la humedad del suelo con varios índices de plasticidad, mientras que el valor de tensión del suelo disminuyó, la expansión del suelo aumentó significativamente por encima del suelo original.

Moghimi et al. (2022); realizaron un estudio sobre la estabilización de la arcilla Amol con ceniza de concha de mar. En el procedimiento realizado, utilizaron distintos porcentajes de ceniza de concha de mar para ser mezcladas con el suelo y se sometió a diferentes pruebas, incluyendo pruebas de resistencia a la compresión, densidad aparente, absorción de agua y estabilidad dimensional. Los resultados mostraron que el tiempo y la temperatura apropiados para la incineración de la concha de mar en este estudio se establecieron en una hora a 900°C, además, se demostró que la ceniza puede mejorar considerablemente la resistencia y durabilidad de la arcilla, con un aumento máximo al utilizar un porcentaje de ceniza de 9%. Así, concluyeron que la adición de ceniza convierte al suelo en una estructura más rígida y densa, corroborando la efectividad de la ceniza de concha de mar como un aditivo no tradicional para la estabilización de suelos.

Etim et al. (2022); evaluaron el uso de una mezcla de cal y ceniza de concha de abanico para estabilizar suelos lateríticos que se pretendían utilizar como subrasante. Así, describen que los suelos lateríticos son comunes en regiones tropicales, presentan poca resistencia y son propensos a la erosión y, por lo tanto, se necesitan técnicas de estabilización para mejorar sus propiedades mecánicas y hacerlos adecuados para ser utilizados en la construcción de carreteras. Se utilizaron muestras de suelo laterítico recolectadas de una zona de Nigeria y se realizaron ensayos de laboratorio para evaluar la resistencia a la compresión y a la flexión con diferentes cantidades de cal y ceniza de concha de abanico. Así, con los resultados obtenidos, determinaron que la combinación óptima de cal y de ceniza fue del 8% y 8%, respectivamente, mejorando la resistencia a la compresión del suelo estabilizado en un 27.5% y la resistencia a la flexión en un 13.8%.

4. Metodología

Con el objetivo de desarrollar el estudio, la metodología utilizada en el proyecto de profundización, se resume mediante un gráfico del proceso ordenado tal como se observa en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Diagrama de flujo caracterización de los materiales y tipo de mezclas a analizar

Fuente: Elaboración propia

4.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de trabajo desarrollado es de tipo cuantitativo, pues está basado en la medición de cantidades o magnitudes por tanto, puede ser expresado en datos numéricos, además, puede ser considerada descriptiva, pues expone las características, las propiedades y los rasgos determinantes y particulares de una situación o de un grupo mediante la observación y la reseña de sus componentes, como también explicativa predictiva, para entender el comportamiento de las variables y cuantificar sus relaciones.

Este trabajo también tiene una componente experimental se manipulan las variables independientes para poder probar hipótesis causales de modo empírico, mediante la medición de las variables dependientes.

Hipótesis: La adición de ceniza de cáscara de coco y ceniza de concha de molusco inciden en la resistencia a la compresión y la capacidad de carga de un suelo arcilloso proveniente del distrito Buenaventura.

Grupo Patrón: Conformado por la muestra patrón en estado natural inalterada a la cuales se le harán los ensayos de laboratorio acordados y se obtendrán sus resultados

Grupo experimental: Conformado por mezclas de suelo natural; estabilizantes (ceniza de cascara de coco y concha de molusco molida (andara mollusca) en las proporciones definidas; estabilización del suelo de subrasante y resultados.

Variables y operacionalización

Variables dependientes: Estabilización del suelo de subrasante

- **Definición Operacional:** Se agregó material de ceniza de cáscara de coco y conchas de molusco (Andara mollusca) molida al suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) en la subrasante.
- **Dimensiones:** Estudio de propiedades mecánicas del suelo.
- **Indicadores:** Mejora en las propiedades de los materiales, granulometría, contenido de humedad, Proctor Estándar, Resistencia a la compresión inconfinaada.

Variable independiente: Ceniza de cascara de coco y ceniza de concha de molusco.

- **Definición conceptual:** Materiales que suelen encontrarse desde la costa pacífica norte de Colombia hasta la costa pacífico sur de Perú, además, según algunos estudios, este material al ser sometido a una calcinación adecuada, resulta ser cementante y apropiado para la estabilización, por el gran porcentaje de calcio que predomina en ellos.
- **Definición Operacional:** Se adicionaron cantidades conforme a las proporciones definidas al suelo CH de la subrasante, para comprobar su estabilización.
- **Indicadores:** Se realizó un análisis de la ceniza de cascará de coco y conchas de molusco (andara mollusca) molida.

Población, muestra, muestreo y unidades de análisis población

Población:

El presente estudio consideró como población la Av. Simón Bolívar –Concejo Comunitario de Comunidades Negras de La Victoria, zona rural en el Distrito de Buenaventura

- **Criterios de inclusión:** Se seleccionaron las muestras en la Av. Simón Bolívar –concejo comunitario de comunidades negras de la victoria zona rural en el Distrito de Buenaventura a profundidades entre 1,20m -1.50m mediante pozos exploratorios.
- **Criterios de exclusión:** Se excluyeron cuando en la toma de muestras se encuentre material de relleno sanitario.

Muestra

Se identificó el marco muestral, es decir, la lista, el mapa o las fuentes de donde puede extraerse todas las unidades de muestreos o unidades de análisis en la población, y donde se tomarán los puntos objeto de estudio. Además, en esta etapa se definió el tamaño de la muestra, pues esto influye en la precisión de los resultados.

En esta investigación se consideró que la muestra, como todos los elementos que componen la investigación, dependen de la naturaleza del estudio, los conocimientos y las capacidades del investigador para acceder a ella.

Las muestras se tomaron principalmente en la Av. Simón Bolívar – concejo comunitario de comunidades negras de la victoria zona rural en el Distrito de Buenaventura donde fue extraída 1 calicata.

Muestreo

La muestra fue seleccionada mediante un muestreo probabilístico por conveniencia, en la Av. Simón Bolívar – concejo comunitario de comunidades negras de la victoria zona rural en el Distrito de Buenaventura, en el tramo seleccionado de 2,5 Km, se realizó 1 calicata.

Unidad de Análisis

Los 2.50 km en la Av. Simón Bolívar – concejo comunitario de comunidades negras de la victoria zona rural en el Distrito de Buenaventura.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnica de recolección:

La recopilación de los datos fue empleada mediante la observación experimental y por medio de los ensayos de laboratorio para obtener resultados reales y confiables.

Instrumentos:

Los instrumentos que se emplearon fueron, las especificaciones técnica del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), así mismo los ensayos de laboratorio de suelos correspondientes, con profesionales altamente capacitados en su labor diario.

Dichos equipos y procesos de los ensayos son los siguientes:

- Horno eléctrico
- Balanza calibrada
- Análisis granulométrico
- Limite plástico y líquido (Limite de Atterberg)
- Proctor estándar y resistencia a la compresión inconfiada
- Fichas de control de laboratorio
- Fichas de ensayos en el laboratorio de suelos

Procedimientos:

Para desarrollar el proyecto de investigación, se realizó la búsqueda de información, mediante la obtención de artículos científicos, tesis y manuales de diseño y construcción, entre otros, los cuales estuvieran relacionados con la presente investigación.

El estudio ubicado en la Av. Simón Bolívar – concejo comunitario de comunidades negras de la victoria zona rural en el Distrito de Buenaventura contempló la realización del estudio topográfico con sus respectivas memorias y georreferenciado con las coordenadas magna sirgas procesadas, donde se localizaron los apiques para analizar los resultados y finalmente obtener una dosificación óptima para la estabilización de este tipo de suelo.

Método de análisis de datos:

Los métodos que se emplearon en el estudio fueron las fichas y formatos técnicos proporcionados por el laboratorio de suelos de la Universidad del Cauca, con sus certificados respectivos, también se utilizaron los programas Microsoft Word y Excel 2019.

Aspectos éticos

La realización de la presente investigación está conforme a los lineamientos aprobados de ética de la Universidad del Cauca, con una Resolución de Consejo Universitario N.º 272/U del Cauca aprobado y autorizado con fecha 20 de diciembre del 2017.

Por principio de beneficencia, los autores del presente proyecto de investigación otorgaron una visión más panorámica respecto a las informaciones proporcionadas e incentivaron a más personas a que realicen investigaciones con temas similares respecto hacia la Maestría de Ingeniería de Pavimentos.

Al respecto con el principio de no malintencionado, los autores no alteraron ni utilizaron los resultados para beneficio propio, además el principio de Autonomía, toda información que es usado por los investigadores fue corroborado por medio del software que verá el porcentaje de plagio y originalidad.

Por último, en el principio de justicia los autores son los mayores responsables en facilitar y sustentar toda información real al 100% y que será sometido a la justicia.

4.2. Marco normativo

Para el desarrollo de la investigación, se tuvieron en cuenta las especificaciones generales de construcción de carreteras y las normas de ensayos para materiales de carreteras del Instituto Nacional de Vías. Las normas mencionadas se mencionan en la Tabla 7.

Tabla 7. Normas INVIAS utilizadas.

Norma INVIAS		Descripción
I.N.V. E - 120-13	Determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de Lambe	Esta norma describe el método para la identificación rápida de suelos que puedan presentar problemas de cambio de volumen, como consecuencia de variaciones en su contenido de humedad.
I.N.V. E - 123-13	Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos	Esta norma permite determinar de forma cuantitativa la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo. La distribución de las partículas mayores a 75 μm (Retenidas en el tamiz No. 200) se determina por tamizado, mientras que la distribución de los tamaños de las partículas menores de 75 μm se determina por medio de hidrómetro (proceso de sedimentación).
I.N.V. E - 125-13	Determinación del límite líquido de los suelos	Esta norma permite determinar el límite líquido en suelos.
I.N.V. E - 126-13	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	Esta norma describe el procedimiento que se lleva a cabo para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos
I.N.V. E - 127-13	Determinación de los factores de contracción de los suelos	Esta norma tiene permite determinar el límite de contracción, la relación de contracción, el cambio volumétrico y la contracción lineal en suelos.
I.N.V. E - 128-13	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua	Este ensayo se utiliza para determinar la gravedad específica de los suelos que pasan el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y del llenante mineral de las mezclas asfálticas (filler), por método del picnómetro.
I.N.V. E - 141-13	Relaciones de humedad - peso unitario seco en los suelos (Ensayo Proctor estándar de compactación)	Los siguientes métodos de ensayo permiten determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactados con un martillo de 24.5 N (5.5 lbf) que cae libremente desde una altura de 305 mm (12") en un molde de 101.6 o 152.4 mm (4 o 6") de diámetro, esto con el fin de obtener una energía de compactación aproximada de 600 kN-m/m ³ (12400 lbf-pie/pie ³).
I.N.V. E - 148-13	CBR de los suelos compactados en el laboratorio	Esta norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos de subrasante, subbase y base, denominado CBR (California Bearing Ratio); este método de ensayo principalmente se emplea para la evaluación de la resistencia de materiales que contengan tamaños máximos de partículas de menos de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ").
I.N.V. E - 235-13	Valor de azul de metileno en agregados finos	Esta norma permite determinar el valor de azul de metileno de la fracción que pasa el tamiz 4.75mm (No. 4) de la mezcla total de agregados.
I.N.V. E - 605 - 13	Resistencia a la compresión inconfiada de mezclas compactadas de suelo cal	Esta norma describe el proceso de preparación y obtención de la resistencia inconfiada de suelos estabilizados o en los cuales se haya utilizado cal.

Fuente: Hernández y Herrera (2019)

4.3. Marco geográfico

El municipio de Buenaventura está situado dentro de la región del choco biográfico el cual cubre una superficie de 50.000 km² y va desde la división de aguas de la cordillera occidental hasta el litoral y los límites de Panamá hasta las fronteras con el Ecuador con 1.400 km de costas que incluyen 9 parques naturales y 15 distritos biogeográficos, siendo una de las regiones de mayor biodiversidad del mundo.

El municipio es el más extenso del valle del Cauca con una extensión de 6.297 km² (29,7% del área total del departamento del Valle del Cauca), su territorio abarca todos los pisos térmicos, desde el litoral hasta los inicios del páramo en la cordillera occidental y su zona urbana tiene 2.160,9 hectáreas (Has), en esta se encuentra la bahía del mismo nombre ubicada en la región Noroeste en 3°50' de latitud norte (N) y 77°06' de longitud oeste (W), la bahía presenta una extensión de 20 km con una longitud que varía entre 2,3 y 4,5 km.

La posición geográfica de la cabecera municipal corresponde a las coordenadas 3°53' latitud Norte, 77°05' longitud oeste y está situada aproximadamente a 7m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar). Buenaventura se constituye en el principal puerto sobre el mar pacífico por tener un alto movimiento de carga comparado con el resto de los puertos del país. Esta situación le confiere un reconocimiento o posición geoestratégica al interior de la cuenca internacional del pacífico.

La ciudad consta de una zona insular (isla del cascajal), donde se concentra la mayoría de las actividades económicas y de servicio y otra continental esta última con una vocación residencial e industrial. Su configuración se ha dado en forma longitudinal a lado y lado de su vía principal, la Avenida Simón Bolívar con una extensión aproximada de 13 kilómetros y que comunica a la ciudad con el interior del país,

Buenaventura es una ciudad y puerto marítimo ubicado en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Se encuentra en la costa pacífica, al sureste del país. Limita al norte con los municipios de Dagua y La Cumbre, al este con los municipios de Vijes y Yotoco, y al sur con el océano pacífico. En la Ilustración 1 se observa la ubicación geográfica del Distrito de Buenaventura en el departamento del Valle del Cauca.

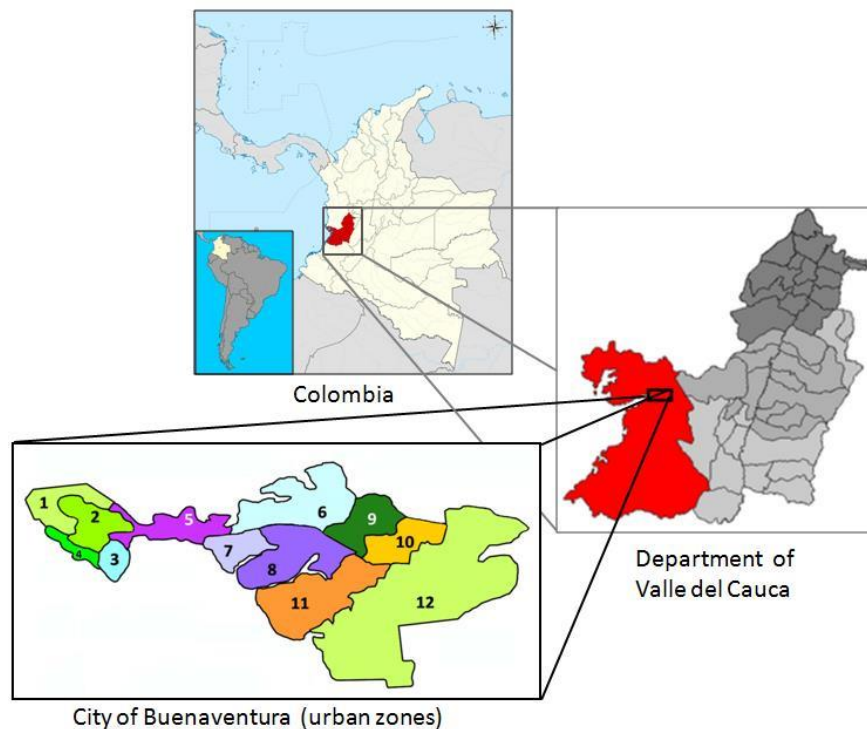


Ilustración 1. Localización Distrito Buenaventura.

Fuente: Fong et al. (2012)

La topografía de Buenaventura es montañosa, debido a la cercanía de la cordillera Occidental de Los Andes. La ciudad se encuentra en una planicie costera con ondulaciones fuertes y suaves, con terrenos bajos y anegadizos la formación física que se extiende hasta las estribaciones de la cordillera, donde hay numerosas colinas y montañas. Es considerada una ciudad cálida y húmeda, con una temperatura media anual de 27°C, con lluvias frecuentes durante todo el año.

El sector agrícola y pesquero son importantes para la economía local y regional. Los cultivos más importantes de la región es la palma aceitera, que se cultiva en pequeñas parcelas en las zonas de transición entre la costa y las montañas. También destacan el plátano y el coco, que se utilizan tanto en la fabricación de alimentos como para la fabricación de productos cosméticos y artesanías. Al ser una zona pesquera, se obtiene en grandes cantidades pescado fresco y seco, además de moluscos, gracias a la biodiversidad del océano Pacífico, entre los cuales se encuentran los camarones, los langostinos, las almejas y los mejillones, los cuales son utilizados en la gastronomía local y también son exportados a otros lugares del país y del mundo.

4.4. Trabajo de campo

4.4.1. Muestras de suelo patrón (Suelo fino arcilloso de alta plasticidad CH)

El estudio se centró en la evaluación de suelos finos de baja estabilidad como los limos y las arcillas. El lugar donde se extrajo la muestra de suelo se encuentra en las coordenadas Latitud: 3°798285 N, Longitud: 77 009877W, en el Concejo Comunitario de Comunidades Negras de La Victoria, de la zona rural del distrito de buenaventura, departamento del Valle del cauca, parte baja de la cuenca del rio Dagua, tal como se muestra en la Ilustración 2. El suelo existente está conformado por arcillas de alta plasticidad CH, de la formación raposo. Se realizó una prospección a cielo abierto o calicatas, a una profundidad de 1.50m, encontrándose en el terreno inicialmente un pequeño estrato de 0.1m de material vegetal con presencia de raíces, y seguido de un estrato de 1.40m de suelo de grano muy fino, de color marrón amarillento, con una consistencia blanda, en condiciones húmeda con una estructura homogénea (ver Ilustración 3 e Ilustración 4).



Ilustración 2. Ubicación del lugar de extracción de la muestra de suelo.

Fuente. Google Earth.



Ilustración 3. Técnicos realizando la excavación de la calicata

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4. Muestras de suelo patrón natural extraído in situ.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la excavación, las muestras extraídas fueron almacenadas en el laboratorio, para su posterior análisis. Dichas muestras fueron clasificadas como muestras alteradas mediante excavación (ver Ilustración 5) y también, muestras inalteradas mediante el hincado de tubos de pared delgada.



Ilustración 5. Muestras alteradas mediante excavación en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Ceniza de cáscara de coco

La cascara de coco se obtiene a partir del proceso de tusado, el cual consiste en realizar cortes al coco retirando parcialmente parte de la cáscara (exocarpo y mesocarpio); y el proceso de pelado, el cual consiste en el retiro total del exocarpo y el endocarpo (cáscara) de coco (ver Ilustración 6). Dichas actividades se realizan durante la cosecha en los plantíos “cocales”, procedente de los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca y Chocó, los cuales son transportados vía fluvial y marítima al distrito de Buenaventura para ser almacenado en bodegas para su posterior distribución y comercialización en el casco urbano y los principales sitios e abastos y plazas de mercados de las capitales y ciudades del interior del país.



*Ilustración 6. Plantío de coco y coco tusado.
Fuente: Elaboración propia.*

Se realizó la recolección de la cáscara de coco en el distrito de Buenaventura, Valle del Cauca, la cual fue incinerada a una temperatura aproximada de 600°C directamente en la región y, posteriormente llevada al laboratorio de la Universidad del Cauca. Dicho material fue pasado por el tamiz N°200, el cual fue la muestra de ceniza que se utilizó en el proceso de estabilización del suelo, tal como se muestra en la Ilustración 7.



Ilustración 7. Muestras de ceniza de cáscara de coco

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Ceniza de concha de molusco

El molusco "Andara Mollusca" es capturado en los manglares a lo largo de la costa pacífica colombiana y puede ser fácilmente obtenida en los sitios de disposición final en los centros de comercialización del casco urbano y las comunidades dispersas o centros poblados de la zona rural marítima, en donde se realiza la captura y comercialización. Estos residuos son desechos que la comunidad no lo destina a ningún uso especial. Las conchas de molusco utilizadas en la presente investigación se localizan en las partes de atrás de las viviendas palafitas ubicadas en la zona rural marítima del distrito de Buenaventura, Corregimiento de Punta Bonita (azoteas y antejardines) de algunas viviendas (ver Ilustración 8).

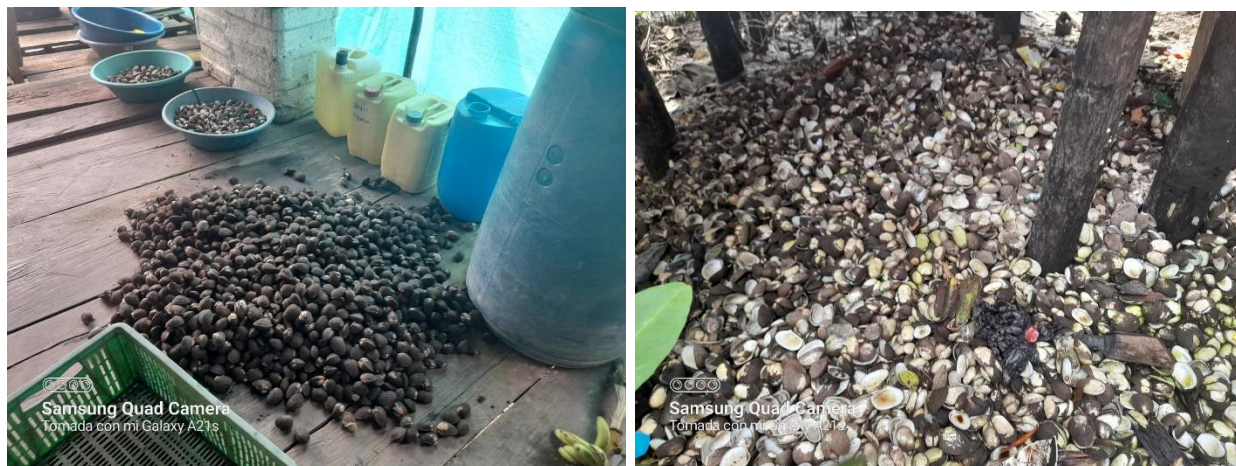


Ilustración 8. Proceso de selección, tratamiento y disposición concha de molusco. Zona rural Buenaventura.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez seleccionadas las muestras, fueron ensacadas y transportadas al sitio de trabajo en donde fueron lavadas, secadas y trituradas, parcialmente con un equipo para Proctor (ver Ilustración 9), logrando la reducción de las conchas a menores tamaños facilitando el trabajo en laboratorio secando a temperaturas mayores a 700°C durante 24 horas para su posterior molienda empleando molinos de disco hasta lograr pasante del tamiz N° 200 (75µm).



Ilustración 9. Concha de molusco triturada.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el proceso de calcinación de dos maneras, inicialmente, se llevó a cabo en una mufla eléctrica de laboratorio, la cual fue llevada a una temperatura de 700°C por 2 horas. Sin embargo, para optimizar el proceso, se utilizó una mufla de gas, tal como se observa en la Ilustración 10.



Ilustración 10. Calcinación de la concha de molusco.

Fuente: Elaboración propia.

Del proceso de incineración, se obtuvo la ceniza de concha de molusco, la cual fue posteriormente pulverizada mecánicamente, para obtener la cantidad de material Pasa Tamiz N°200, como se observa en la Ilustración 11.



Ilustración 11. Compactación de la ceniza de concha de molusco para obtener material Pasa Tamiz N°200.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4. Mezclas de suelo con los estabilizantes.

El proceso de dosificación, mezcla y evaluación de suelo más estabilizantes, se realizó de manera manual.

En primer lugar, se calculó la cantidad necesaria de los materiales, como lo es el suelo arcilloso de alta plasticidad (pasante del tamiz N°4), la ceniza de cáscara de coco (pasante del tamiz N°200) y la ceniza de concha de molusco (pasante del tamiz N°200). Posteriormente, se realizaron las distintas mezclas de suelo con ceniza de cáscara de coco, garantizando las dosificaciones de ceniza (3%, 7%, 12% y 15% del peso seco de la muestra) establecidas en la metodología, como se observa en la Ilustración 12. De igual manera se procedió con la respectiva muestra de suelo con ceniza de concha de molusco, de tal manera que se garantizaran las dosificaciones de ceniza (2%, 4%, 7% y 10% del peso seco de la muestra) establecidas previamente.



Ilustración 12. Mezcla de muestra de suelo con ceniza de cáscara de coco.

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio seleccionados en la presente investigación fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Suelos de la Universidad del Cauca. Dichos ensayos se describen brevemente, a continuación:

4.5.1. Potencial de expansividad en el aparato de Lambe (INV E - 120)

Se seleccionó una muestra representativa del suelo y se secó en horno a una temperatura no mayor a 60°C. Luego, se tamizó la muestra para eliminar las partículas mayores a 19 mm y se mezcló homogéneamente. Posteriormente, se colocó la muestra en el anillo porta-probeta y se compactó en tres capas iguales con una energía específica determinada según el tipo de suelo. Después, se retiró el anillo guía y se niveló la superficie superior. Luego, se colocó la probeta compactada en el aparato medidor de Lambe y se sumergió completamente en agua destilada durante 24 horas. Luego, se aplicó una presión creciente hasta que se alcanzara un valor muy pequeño del Índice de Expansión. Y, por último, con los valores obtenidos se pudo calcular dicho índice mediante la utilización de la gráfica de cambios volumétricos especificada en la norma (ver Ilustración 13).



Ilustración 13. Ensayo de potencial de expansividad en el aparato de Lambe.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Granulometría (INV E - 123)

- Por tamizado:

Se trabajó con una muestra secada en el horno a 110°C hasta masa constante, para luego lavarse por el tamiz N°200 y poder separar los finos. El retenido en este tamiz se introdujo al horno nuevamente a 110°C hasta masa constante y se determinó el peso final de finos. Esta muestra fue tamizada de nuevo, en este caso por los siguientes tamices: tamiz 3/8" (9,52mm), tamiz N°4 (4,75mm) (ver Ilustración 14), N°10 (2mm), N°20 (0,85mm), N°40 (0,425mm), N°100 (0,15mm) y N°200 (0,075mm). Por último, se determinó el porcentaje de gravas, arenas y finos.



Ilustración 14. Ensayo de granulometría por tamizado.

Fuente: Elaboración propia.

- Por hidrómetro:

Se realizó con una muestra de 50 gramos de masa seca del material pasante del tamiz #200 (0,075 mm). Se mezcló la muestra con una solución dispersante para luego dejarla saturar por 16 horas. Después del periodo de saturación de la muestra, la lechada se mezcló mediante instrumento agitador mecánico, se introdujo en una probeta de 1000 mL, se aforó con agua destilada y se agitó girando a 180° durante un minuto para luego proceder a tomar lecturas (ver Ilustración 15). Posteriormente se realizaron lecturas de densidad y temperatura, con un hidrómetro 152-H y un termómetro, a los 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos .



Ilustración 15. Ensayo de granulometría por hidrómetro.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.3. Límite líquido (INV E - 125)

La norma plantea dos métodos de aplicación; para esta investigación, se optó por el método A o multipunto. El límite líquido se determina mediante el aumento de humedad del suelo progresivamente, hasta que se adquiere una consistencia tal que, el número de golpes requeridos sea para el primer punto de 25 a 35, el segundo entre 20 y 30 y el tercer punto entre 15 y 25 golpes, para los cuales la pasta de suelo se ponga en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de aproximadamente 13mm (1/2") (ver Ilustración 16). Se registró el número de golpes requerido para cerrar la ranura al cabo de varios ensayos de contenidos de agua sucesivamente mayores. Se tomó una muestra de la parte en la cual hizo contacto la pasta de suelo y se tomaron los pesos antes y después de dejarse en el horno a una temperatura de 110°C .



Ilustración 16. Ensayo de límite líquido.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.4. Límite plástico e índice de plasticidad (INV E - 126)

El límite plástico es la humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de 3,2mm o 1/8" de diámetro, sin que ellos se agrieten o desmoronen. Este ensayo se realizó presionando pequeñas muestras de suelo para fabricar rollos de 3.2mm (1/8") de diámetro, hasta que su contenido de agua se redujo al punto de generarse agrietamiento y/o desmoronamiento de los rollitos. Por último, todas estas fracciones de muestras se llevaron al horno a 110°C, para poder determinar su humedad.

4.5.5. Límite de contracción (INV E - 127)

Se tomó la muestra de suelo de grano fino y se remoldeó completamente con un contenido de agua que dio lugar a una consistencia similar a la del límite líquido. La pasta saturada se colocó en un recipiente de volumen conocido y se secó lentamente. Se determinaron la masa y el volumen de la pastilla de suelo que se formó finalmente. Estas medidas se emplearon para calcular las constantes del suelo, incluyendo el límite de contracción, relación de contracción, cambio volumétrico y contracción lineal. Este método solo es aplicable a suelos finos cohesivos que presenten resistencia cuando se secan al aire.

4.5.6. Gravedad específica (INV E - 128)

Se empleó el método A, el cual se recomienda para muestras de suelo húmedas. Se recolectaron tres muestras de suelo y se dispersaron sus agregados mediante el uso de agua, luego se introdujeron en un mezclador mecánico. Cada mezcla se vertió en su matraz correspondiente, cuyo peso se conoce, asegurándose de no dejar ningún material

detrás y llenando el matraz hasta tres cuartas partes de su capacidad. A continuación, se eliminó el aire utilizando una bomba de vacío (ver Ilustración 17), se aforó completamente el matraz hasta la línea de enrase, y se pesó. Se tomó la temperatura del ensayo y finalmente se vertió la suspensión en un recipiente de masa conocida, sin desperdiciar ningún material, para su posterior secado en un horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. De esta forma se evaporó el agua y se determinó la masa seca del material.



Ilustración 17. Ensayo de gravedad específica.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.7. Azul de Metileno (INV E 235)

La muestra fue sometida a un proceso de secado al colocarla en una bandeja de aluminio y calentándola en un horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante al menos 24 horas. Luego, se retiró la bandeja del horno y se enfrió a temperatura ambiente en un desecador. En la siguiente etapa, se preparó una solución de azul de metileno del 0,05% en agua destilada. La muestra de agregado seco se colocó en una botella con una cantidad conocida de solución de azul de metileno, se tapó y se agitó manualmente durante 5 minutos antes de dejar la botella reposar durante 30 minutos. Después, se filtró la solución y se midió el volumen del líquido filtrado en un vaso de precipitados (ver Ilustración 18). Se leyó el valor de absorbancia de la solución filtrada utilizando un espectrofotómetro y se utilizó una fórmula específica de la norma E-235 para calcular el valor de azul de metileno en la muestra de agregado fino.



Ilustración 18. Ensayo de Azul de Metileno.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.8. CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada (INV E - 148)

En primer lugar, se realizó el ensayo CBR a la muestra de suelo inalterada, de la siguiente manera:

Se tomó la muestra inalterada del suelo utilizando un molde de filo cortante de 152.4 mm (6") de diámetro en el tramo de vía en el Concejo Comunitario de Comunidades Negras de La Victoria, de la zona rural del distrito de buenaventura, departamento del Valle del cauca y se trasladó al laboratorio. Luego, se cortó la muestra inalterada en discos de 152.4 mm (6") de diámetro y 127 mm (5") de altura y se midió la densidad seca de la muestra y se calculó su peso unitario seco. Posteriormente, se sumergió la muestra en agua durante 96 horas para saturarla y luego se midió la densidad saturada de la muestra y se calculó su peso unitario saturado. Se colocó la muestra en el molde CBR con el disco espaciador especificado en la norma. Se aplicó una carga vertical a la muestra a una velocidad de deformación de 1.27 mm/min (0.05 pulg/min) hasta que se alcanzó una deformación del 2.54 mm (0.1 pulg). Así, se midió la carga vertical necesaria para

producir la deformación del 2.54 mm (0.1 pulg) y se calculó el índice de soporte de California (CBR).

De igual manera, se realizó el ensayo CBR sobre una muestra de suelo compactada en laboratorio, por lo que el procedimiento realizado se describe a continuación:

Se compactaron cuatro muestras de suelo en moldes de CBR, cada muestra se compactó en cinco capas con un contenido de humedad específico. El objetivo era determinar las relaciones entre la humedad y la densidad seca del suelo (curvas de compactación) para tres diferentes energías de compactación (10, 25 y 56 golpes por capa). Una vez compactadas, se colocó una placa perforada con vástago ajustable y una sobrecarga de aproximadamente 10 libras sobre cada muestra, y se sumergieron en un tanque permitiendo el libre acceso del agua en las partes superior e inferior. Se midió la expansión durante cuatro días con un trípode de medida, haciendo coincidir el vástago del deformímetro con el de la placa perforada. Después del periodo de inmersión, se sacaron las muestras del tanque, se escurrió el exceso de agua durante 15 minutos y se procedió al ensayo de penetración.

Usando la misma sobrecarga que se aplicó durante el período de inmersión, se montó un dial para medir la penetración del pistón y se ajustó a cero, junto con el dial del anillo dinamométrico.

Se utilizó un gato para aplicar una carga constante en el pistón de penetración, mientras se medía la velocidad de penetración de 1.27 mm (0.05") por minuto con un deformímetro de penetración y un cronómetro. Se registraron las lecturas de carga correspondientes a las penetraciones de 0.025", 0.050", 0.075", 0.100", 0.125", 0.150", 0.175", 0.200", 0.300", 0.400" y 0.500" (ver Ilustración 19).



Ilustración 19. Ensayo CBR en muestra inalterada.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.9. Resistencia a la compresión inconfiada (INV E 605)

Se compactaron briquetas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura (relación altura/diámetro de 2) utilizando la humedad óptima y la energía del Proctor estándar. Luego, las briquetas se almacenaron en cámaras de humedad. Después del tiempo de curado, se aplicó una carga con un aparato de compresión, un deformímetro y un cronómetro para producir una deformación axial a una velocidad constante del 2.5% por minuto. La carga se mantuvo hasta que se observó una disminución en la deformación a medida que la carga aumentaba (ver Ilustración 20).



Ilustración 20. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada.

Fuente: Elaboración propia.

5. Análisis de resultados

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados, incluyendo su título, valores obtenidos y análisis correspondiente.

5.1. Caracterización física de los materiales en estado natural

5.1.1. Granulometría

El análisis granulométrico se realizó con base en la norma INV E-123-13.

Ceniza de cáscara de coco

Los resultados de la determinación de los tamaños de las partículas se muestran en la Tabla 8. Además, se muestra en la Gráfica 2, la curva granulométrica correspondiente.

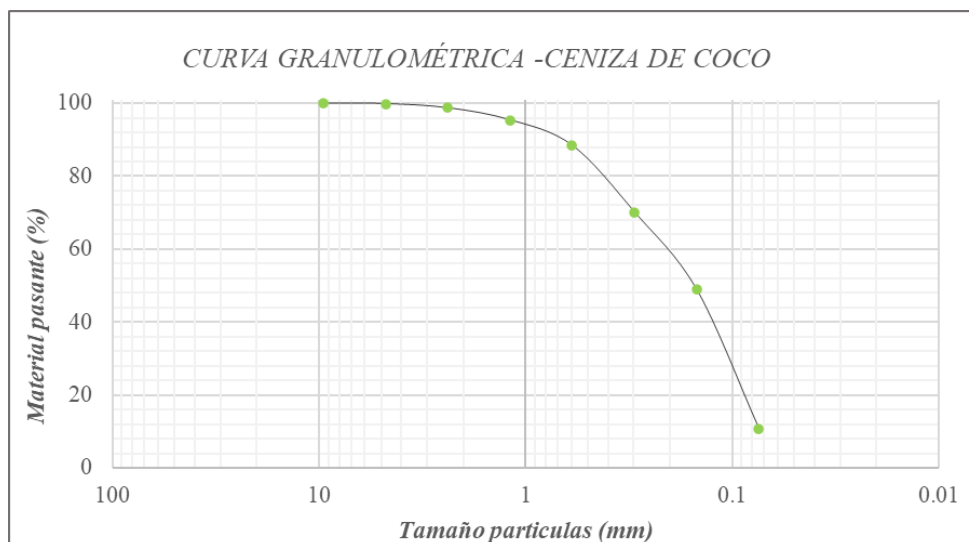
Se puede observar que el material estaba constituido por un pasante del tamiz N°200 del 11%, por lo que su fracción fina fue muy poca. Lo anterior evidenció la necesidad de realizar trituración mecánica de la ceniza para así, lograr optimizar su uso.

Tabla 8. Datos del ensayo de granulometría - Ceniza de cáscara de coco.

DATOS DE GRANULOMETRIA					
Masa del material seco: 341.3 g					
TAMIZ	MASA RETENIDA	% MASA RETENIDA	% RETENIDA ACUMULADA	% PASA	% PASA APROXIMADO
3/8 "	0.0	0.0	0.0	100.0	100
N° 4	0.4	0.1	0.1	99.9	100
N° 8	4.0	1.2	1.3	98.7	99
N°16	11.3	3.3	4.6	95.4	95
N° 30	23.9	7.0	11.6	88.4	88
N° 50	62.4	18.3	29.9	70.1	70
N° 100	72.5	21.2	51.1	48.9	49
N° 200	129.9	38.1	89.2	10.8	11
Pasa N°200	36.9	10.8	100.0	0.0	0

COEFICIENTES	D10	0.0733	Cu = 2.92 Cc= 0.71
	D30	0.1055	
	D60	0.2140	

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 2. Curva granulométrica - Ceniza de cáscara de coco.

Fuente: Elaboración propia.

Concha de molusco

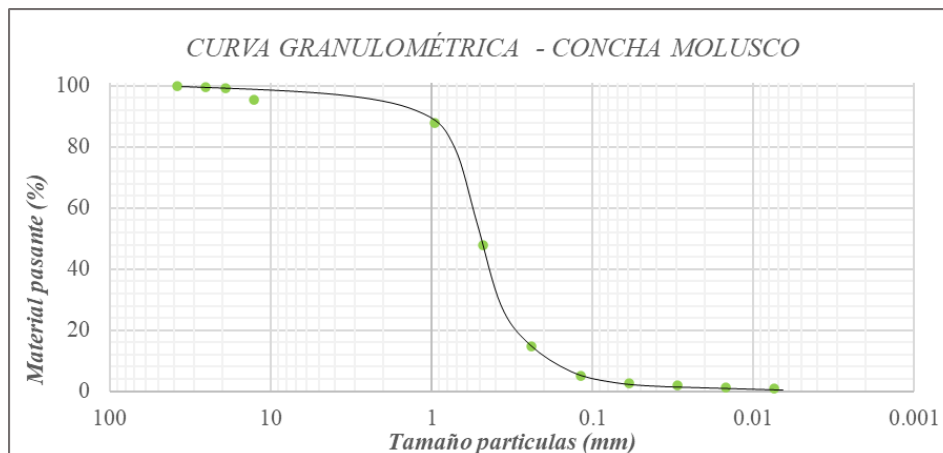
Los resultados de la determinación de los tamaños de las partículas de la concha de molusco se muestran en la Tabla 9, así como en la Gráfica 3. De acuerdo con los resultados, se puede observar que posee pocos finos, por lo cual se decidió realizar la calcinación del material y posterior trituración mecánica, pues así se pudieron aprovechar de manera óptima las propiedades del material.

Tabla 9. Datos del ensayo de granulometría - Concha de molusco.

DATOS DE GRANULOMETRIA					
<i>Masa del material seco: 341.3 g</i>					
TAMIZ	MASA RETENIDA	% MASA RETENIDA	% RETENIDA ACUMULADA	% PASA	% PASA APROXIMADO
1 1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0	100
1"	16.5	0.5	0.5	99.5	100
3/4"	6.3	0.2	0.7	99.3	99
1/2 "	118.8	3.9	4.6	95.4	95
3/8 "	230.4	7.5	12.1	87.9	88
N° 4	1232.6	40.0	52.1	47.9	48
N° 8	1023.4	33.2	85.3	14.7	15
N° 16	297.8	9.7	95.0	5.0	5
N° 30	70.2	2.3	97.2	2.8	3
N° 50	26.6	0.9	98.1	1.9	2
N° 100	19.3	0.6	98.7	1.3	1
N° 200	14.3	0.5	99.2	0.8	0.8
Pasa N° 200	24.9	0.8	100.0	0.0	0

COEFICIENTES	D10	0.1699	Cu = 3.46 Cc= 1.08
	D30	0.3277	
	D60	0.5871	

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 3. Curva granulométrica - Concha de molusco.

Fuente: Elaboración propia.

Suelo en estado natural - Buenaventura

Los resultados de la determinación de los tamaños de las partículas del suelo en estado natural se muestran en las Tabla 10 y Tabla 11 como en la Gráfica 4. De acuerdo a estos resultados, se puede observar que dicho suelo fino contiene un pasante del tamiz N°200 mayor al 86% y un gran contenido de fracción fina según el ensayo del hidrómetro realizado.

Tabla 10. Datos del ensayo de granulometría (Tamizado) - Suelo - Buenaventura.

DATOS DE GRANULOMETRIA					
Masa del material seco: 352.6 g					
TAMIZ	MASA RETENIDA	% MASA RETENIDA	% RETENIDA ACUMULADA	% PASA	% PASA APROXIMADO
N° 4	0.0	0.0	0.0	100.0	100
N° 8	0.3	0.1	0.1	99.9	100
N°16	0.3	0.1	0.2	99.8	100
N° 30	0.4	0.1	0.3	99.7	100
N° 50	1.4	0.4	0.7	99.3	99
N° 100	11.8	3.3	4.0	96.0	96
N° 200	33.3	9.4	13.5	86.5	87
Pasa N°200	305.2	86.6	100.0	0.0	0

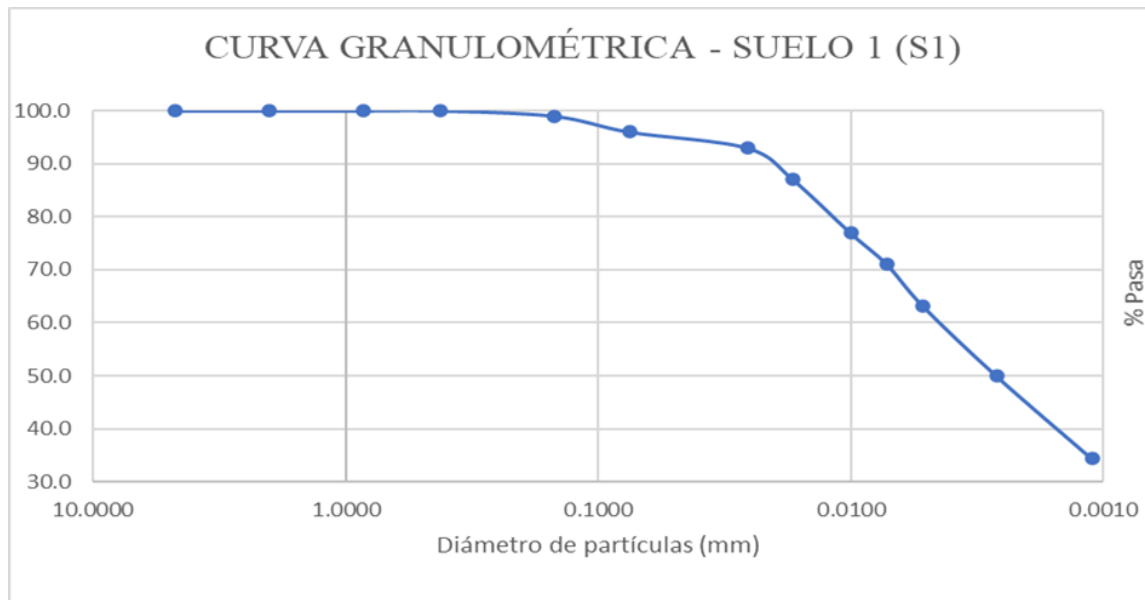
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Datos del ensayo de granulometría (Hidrómetro) - Suelo - Buenaventura

DATOS DE GRANULOMETRIA						
Gravedad Específica (Gs) = 2,66			Corrección Agente Flouculante			Masa Suelo Seco = 50 g
Tiempo (min)	Temperatura	Lec. Hidrómetro	Rcp	Profundidad Efectiva	Diámetro Partículas	% PASA
2	20.7	51.0	51.5	6.97	0.0252	93.0
5	20.5	48.0	48.5	7.42	0.0165	87.0
15	20.5	43.0	43.5	8.17	0.0100	77.0
30	20.6	40.0	40.5	8.62	0.0073	71.0
60	21.0	36.0	36.5	9.26	0.0053	63.2
250	22.6	29.0	29.5	10.38	0.0027	49.0
1440	18.6	22.0	22.5	11.50	0.0012	34.4

DATOS DE ENSAYO	
Masa en suspensión Wo (g)	50
Gravedad específica Gs (g/cm ³)	2.66
Concentración de la solución madre (Xd) (g/L)	40
Volumen de la solución madre en 1L (Vd) (mL)	125
Corrección por agente dispersante (Cd) (g/L)	5
Corrección por menisto (Cm) (g/L)	0.5
Diámetro del cilindro (dc) (cm)	5.95
Volumen bulvo del hidrómetro (Vb) (cm ³)	67

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4. Curva granulométrica - Suelo - Buenaventura.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Gravedad específica

El ensayo de gravedad específica se realizó con base en la norma INV E-128-13.

Ceniza de coco - Pasa N°200

Para la ceniza de cáscara de coco, se obtuvo un valor de gravedad específica promedio de 2.948, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de gravedad específica - Ceniza de coco - Pasa N°200.

Densidad Relativa SH	2.949	2.948	2.901
Gravedad específica de partículas sólidas	2.948	2.948	2.901
PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA	2.948		

Fuente: Elaboración propia.

Concha de molusco - Retenido N°4

La concha de molusco, para material retenido en el tamiz N°4, se obtuvo un valor de gravedad específica promedio de 2.811, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de gravedad específica - Concha de molusco - Retenido N°4.

PROMEDIO	
Densidad Relativa Aparente	2.82
Densidad Relativa SH	2.42
Densidad Relativa SSS	2.70
Densidad Aparente. (Kg/m ³)	2811.0
Densidad SH. (Kg/m ³)	2631.5
Densidad SSS. (Kg/m ³)	2695.2

Fuente: Elaboración propia.

Concha de molusco - Pasa N°4, Retenido N°200

La concha de molusco, para material pasante del tamiz N°4 y retenido del tamiz N°200, se obtuvo un valor de gravedad específica promedio de 2.857, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados de gravedad específica - Concha de molusco - Pasa N°4, Retenido N°200.

PROMEDIO	
Densidad Relativa Aparente	2.75
Densidad Relativa SH	2.75
Densidad Relativa SSS	2.79
Densidad Aparente. (Kg/m ³)	2857.9
Densidad SH. (Kg/m ³)	2742.2
Densidad SSS. (Kg/m ³)	2782.5

Fuente: Elaboración propia.

Concha de molusco - Pasa N°200

La concha de molusco, para material pasante del tamiz N°200, se obtuvo un valor de gravedad específica promedio de 2.806, como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados de gravedad específica - Concha de molusco - Pasa N°200.

Densidad Relativa SH	2.797	2.817	2.771
Gravedad específica de partículas sólidas	2.796	2.816	2.770
PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA	2.806		

Fuente: Elaboración propia.

Suelo en estado natural - Buenaventura

Para el suelo en estado natural - Buenaventura se obtuvo un valor de gravedad específica de 2.659, como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados de gravedad específica - Suelo - Buenaventura.

Densidad de las partículas sólidas	2.661	2.658	2.681
Gravedad específica de partículas sólidas	2.660	2.658	2.680
PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA	2.659		

Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Límites de Atterberg

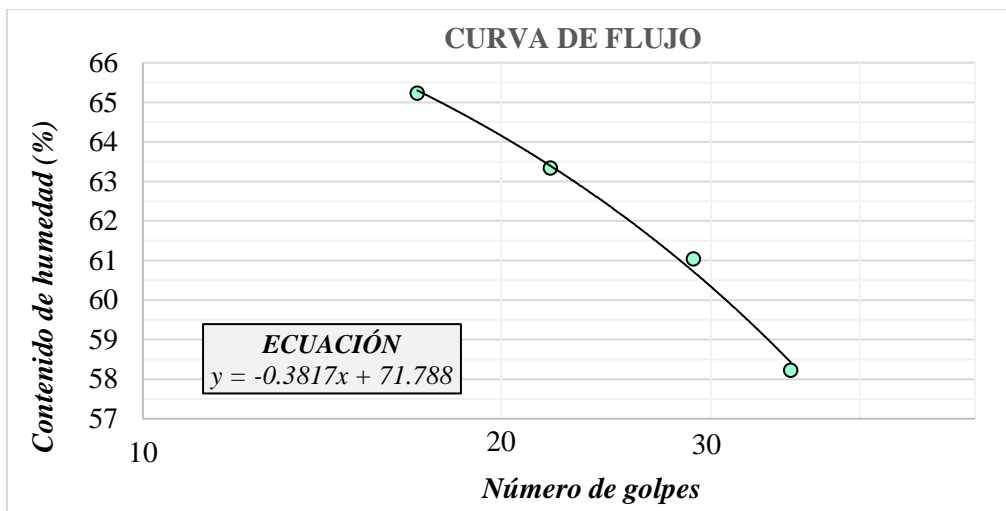
Suelo en estado natural - Buenaventura

Los resultados de los límites de Atterberg del suelo en estado natural se muestran en la Tabla 17 y en la Gráfica 5. De acuerdo con este ensayo, se determinó que el suelo posee un límite líquido de 62%, un límite plástico de 29% y un índice de plasticidad de 33%, lo que permite clasificarlo como una arcilla de alta plasticidad (CH) según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS), adicionalmente, se encontró que su límite de contracción es de 24%.

Tabla 17. Resultados de los límites de Atterberg y Clasificación SUCS - Suelo - Buenaventura.

Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	62
	Límite plástico (%)	29
	Índice de plasticidad (%)	33
	Límite de contracción (%)	24
CLASIFICACIÓN SUCS		CH

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 5. Diagrama de fluidez - Suelo - Buenaventura.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4. Valor de Azul de Metileno

Suelo en estado natural - Buenaventura

Los resultados obtenidos para determinar el valor de Azul de Metileno del suelo en estado natural se observan en la Tabla 18.

Tabla 18. Resultados de Valor de Azul de Metileno - Suelo - Buenaventura.

PARÁMETRO	VALOR
Masa de la muestra de ensayo (g)	200
Volumen total de añadido de la solución colorante (mL)	415
VALOR DE AZUL - VA (mL) >	20.75

Fuente: Elaboración propia.

Este ensayo se emplea para estimar el nivel de arcilla nociva que se encuentra en el suelo y, de los resultados obtenidos, se puede observar que cuenta con una cantidad considerable de material dañino y, por lo tanto, dicho suelo, en estado natural, no posee un desempeño adecuado para ser utilizado como un suelo de subrasante, lo cual justifica el proceso de estabilización que se le emplea más adelante.

5.2. Caracterización mecánica del suelo en estado natural

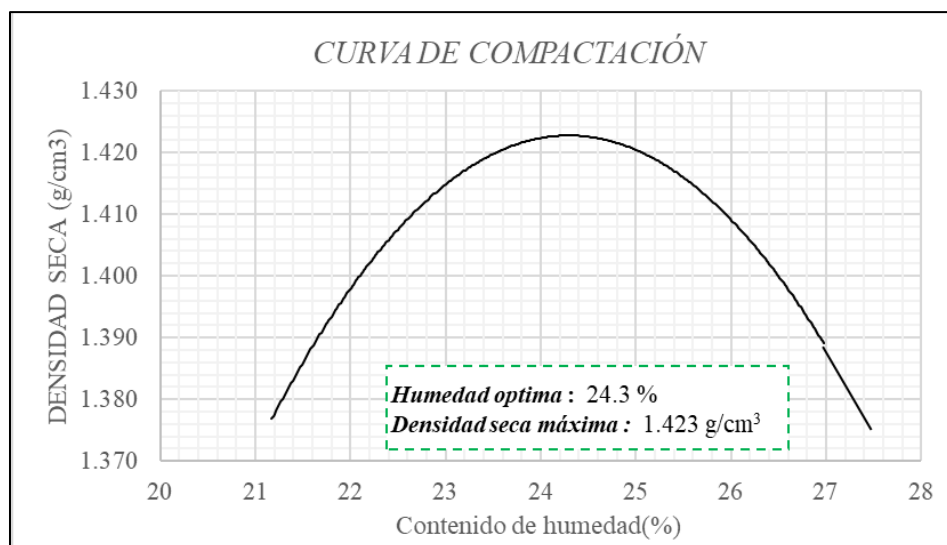
5.2.1. Relación humedad - Peso unitario seco (Ensayo Proctor)

Los resultados del ensayo Proctor Estándar para la determinación de la relación humedad - Peso unitario seco realizados al suelo en estado natural se resumen en la Tabla 19 y en la Gráfica 6. Así, se obtuvo una humedad óptima de 24.3% y una densidad seca máxima de 1.423 g/cm³, valores con los cuales se realizó la compactación de las briquetas a fallar en el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada.

Tabla 19. Resultados del Ensayo Proctor Estándar - Suelo - Buenaventura.

Prueba N°	1	2	3
N° de golpes	25	25	25
Humedad deseada (%)	24.0	28.0	30.0
Humedad Inicial de la muestra (%)	12.0	12.0	12.0
Humedad adicional (%)	12.0	16.0	18.0
Peso muestra húmeda (g)	2200	2500	2200
Peso muestra seca (g)	1964	2232	1964
Agua adicional (cm ³)	236	357	354
Molde N°	9	9	7
Peso muestra húmeda mas molde (g)	3580	3675	3655
Peso molde (g)	2005	2005	1990
Peso muestra húmeda (g)	1575	1670	1665
Humedad de horno (%)	21	24	27
Peso muestra seca (g)	1300	1343	1311
Volumen del molde (cm ³)	944	944	944
Densidad muestra seca (g/cm ³)	1.377	1.423	1.389

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 6. Curva de compactación - Suelo - Buenaventura.

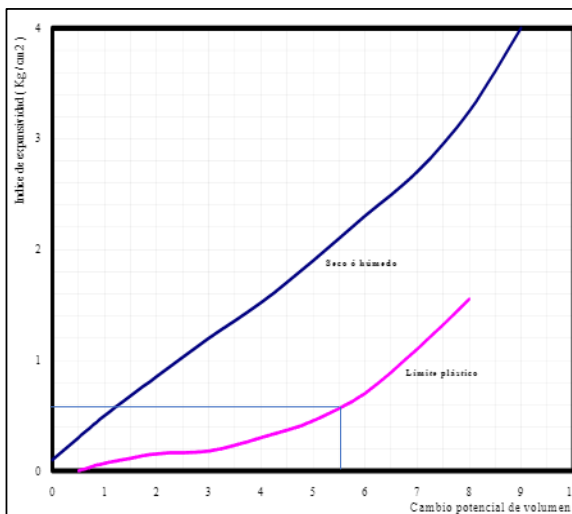
Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Potencial de expansión en el aparato de Lambe

Los resultados del ensayo de determinación del potencial de expansión de un suelo en el aparato de Lambe realizados al suelo sin estabilizante se resumen en la Gráfica 7. Se puede observar una clasificación cualitativa del material en función de unos ciertos grados de expansividad potencial, en la cual se determina como "Crítico". Lo anterior indica que el suelo presenta cambios en su volumen de manera crítica, debido a las variaciones en su contenido de humedad, por lo que es de importancia estabilizarlo para evitar agrietamientos con el paso del tiempo.

<i>ESTADOS DE LA MUESTRA</i>	<i>ANTES DEL ENSAYO</i>	<i>DESPUES DEL ENSAYO</i>
Diámetro (cm)	7	7
Altura (cm)	1.6	1.6
Peso anillo + suelo húmedo (g)	349.2	357.7
Peso anillo + suelo seco (g)	326.3	326.8
Peso anillo (g)	241.8	241.8
Peso de sólidos (g)	84.5	85.0
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.74	1.88
Densidad seca (g/cm ³)	1.37	1.38
Humedad (%)	27	36.4

TIEMPO (min)	LECTURA DIAL (0.0001")	PRESION (kg/cm ²)
1	0	0.00
2	2	0.08
3	3	0.12
4	4	0.16
5	6	0.24
10	12	0.49
15	15	0.61
30	16	0.65
60	16	0.65
90	16	0.65
120	16	0.65



CATEGORIA	CRITICO
-----------	---------

Gráfica 7. Potencial de expansión de Lambe de la muestra en estado natural - Suelo - Buenaventura.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Ensayo CBR para muestra de suelo compactada en laboratorio

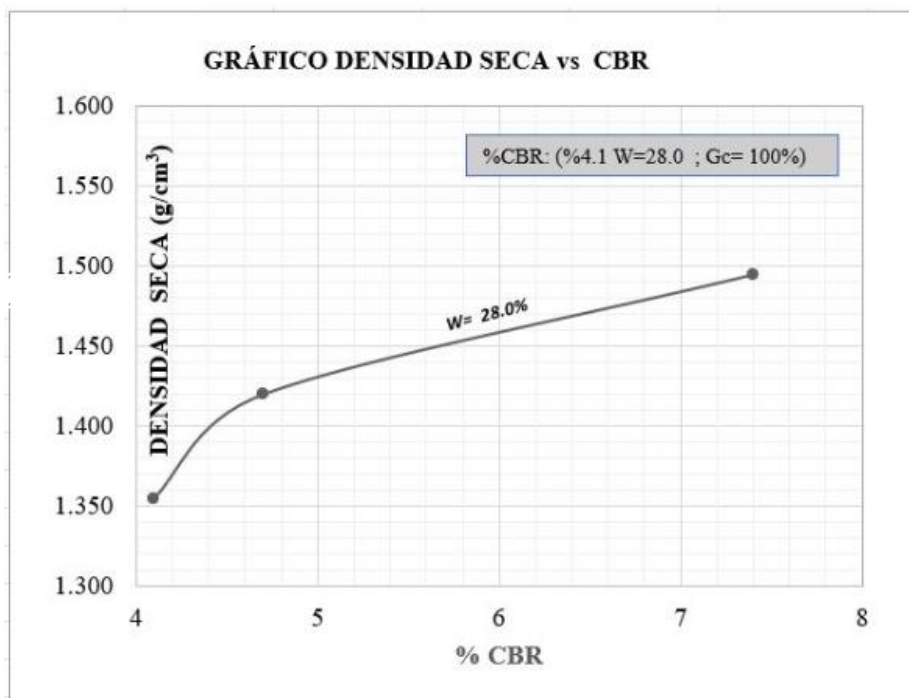
Los resultados del ensayo CBR realizado al suelo compactado en laboratorio y en estado natural o sin estabilizar, se resume en la Tabla 20 y la Gráfica 8.

Tabla 20. Datos del ensayo CBR de la muestra compactada en laboratorio - Suelo - Buenaventura

RESUMEN DE DATOS - CBR - Suelo patrón				
Muestra	1	2	3	4
%CBR 10G	1.6	2.3	2.9	4.3
%CBR 25G	1.9	2.5	2.9	4.9
%CBR 56G	2.9	2.5	4.8	7.1
%EXPAN 10G	4.45	3.97	3.29	2.60
%EXPAN 25G	5.80	5.39	4.31	2.75
%EXPAN 56G	6.57	5.32	5.26	4.16
γ_D 10G (g/cm³)	1.350	1.366	1.362	1.352
γ_D 25G (g/cm³)	1.414	1.463	1.473	1.410
γ_D 56G (g/cm³)	1.541	1.558	1.567	1.522
% W 10G	16.7	22.3	26.2	28.0
%W 25G	15.1	19.6	22.8	28.4
% W 56G	15.379	16.887	22.326	26.306
γ_D (g/cm³)	1.355	1.420	1.495	1.573
CBR (%)	4.1	4.7	7.2	7.4

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera fue posible determinar la capacidad que tiene el suelo de soportar una carga para distintas deformaciones, por lo tanto, para un grado de compactación del 95%, que es el requerido para subrasantes, se obtiene un CBR de 7.2%, además, para un grado de compactación del 100%, se obtiene un CBR de 7.4%. Lo anterior se puede evidenciar en la siguiente gráfica:



Gráfica 8. Gráfica de Densidad seca vs CBR de la muestra en estado natural - Suelo - Buenaventura

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4. Ensayo CBR en muestra de suelo inalterada

Los resultados del ensayo CBR inalterado realizado al suelo en estado natural o sin estabilizar, se resume en la Tabla 21. Datos del ensayo CBR de la muestra inalterada de suelo en estado natural - Suelo - Buenaventura:

Tabla 21. Datos del ensayo CBR de la muestra inalterada de suelo en estado natural - Suelo - Buenaventura

Molde N°				27
Peso muestra húmeda más molde	(g)			8475
Peso molde	(g)			3288
Peso muestra húmeda	(g)			5187
Humedad de horno	(%)			64.4
Peso muestra seca	(g)			3155
Volumen del molde	(cm ³)			3105
Densidad muestra seca	(g/cm ³)			1.02
CBR INALTERADO				
Días inmersión				0
Expansión (%)				0
Penetración	Lect.	Presión	CBR	
0.000	0	0		
0.025	11	7		
0.050	14	9		
0.075	17	11		
0.100	20	13	1.26	
0.150	26	16		
0.200	31	20	1.30	
0.250	35	22		
0.300	38	24		
0.400	45	28		
0.500	52	33		
% W				64.4
PENETRACION				
CONSTANTE ANILLO:	0.63			PSI
CBR LABORATORIO				
Días inmersión				4
Expansión (%)				0.2
Penetración	Lect.	Presión	CBR	
0	0	0		
0.025	8	5		
0.050	14	9		
0.075	17	11		
0.100	20	13	1.26	
0.150	24	15		
0.200	28	18	1.18	
0.250	31	20		
0.300	33	21		
0.400	38	24		
0.500	42	26		
% W				65.1
PENETRACION				
CONSTANTE ANILLO	0.63			PSI

Fuente: Elaboración propia.

De la información obtenida, se observa un valor de CBR aproximado de 1.3% para 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración.

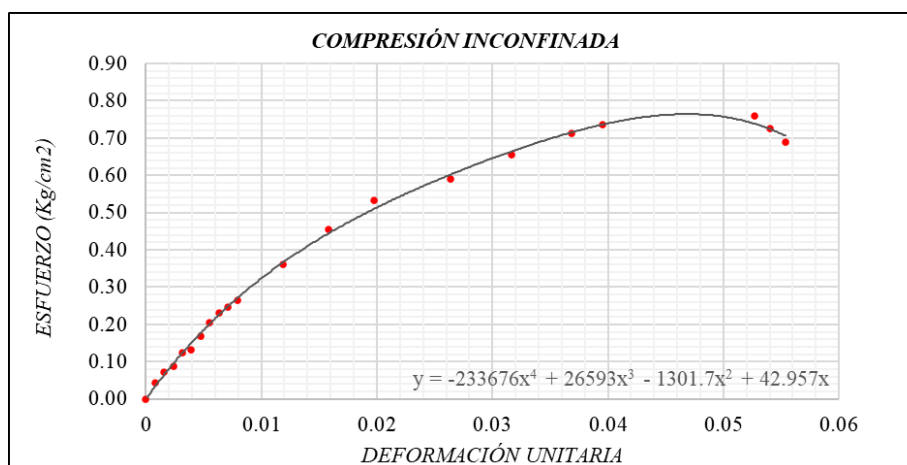
5.2.5. Resistencia a la compresión inconfiada

Los resultados de la resistencia a la compresión inconfiada de una muestra Shelby del suelo están consignados en la Tabla 22 y la Tabla 23, así como en la Gráfica 9 y la Gráfica 10. Para esta condición de ensayo se obtiene una resistencia promedio de 0.7 kg/cm², es decir, de 68.65 kPa.

Tabla 22. Datos del ensayo de RCI de muestra Shelby - Suelo - Buenaventura (a).

DEFORMACIÓN (0.001")	DEFORMACIÓN UNITARIA ($\Delta H/H$)	LECTURA DE CARGA (0.0001")	CARGA (Kg)	AREA CORREGIDA (cm ²)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0.0000	0	0.000	16.330	0.00
3	0.0008	5	0.728	16.343	0.04
6	0.0016	8	1.164	16.356	0.07
9	0.0024	10	1.455	16.369	0.09
12	0.0032	14	2.037	16.382	0.12
15	0.0040	15	2.183	16.395	0.13
18	0.0047	19	2.765	16.408	0.17
21	0.0055	23	3.347	16.421	0.20
24	0.0063	26	3.783	16.434	0.23
27	0.0071	28	4.074	16.447	0.25
30	0.0079	30	4.365	16.460	0.27
45	0.0119	41	5.966	16.526	0.36
60	0.0158	52	7.566	16.592	0.46
75	0.0198	61	8.876	16.659	0.53
100	0.0263	68	9.894	16.772	0.59
120	0.0316	76	11.058	16.863	0.66
140	0.0369	83	12.077	16.955	0.71
150	0.0395	86	12.513	17.002	0.74
200	0.0527	90	13.095	17.238	0.76
205	0.0540	86	12.513	17.262	0.72
210	0.0553	82	11.931	17.286	0.69
220	0.0580	78	11.349	17.335	0.65

Fuente: Elaboración propia.



RESISTENCIA MÁXIMA = 0.76 Kg/cm²

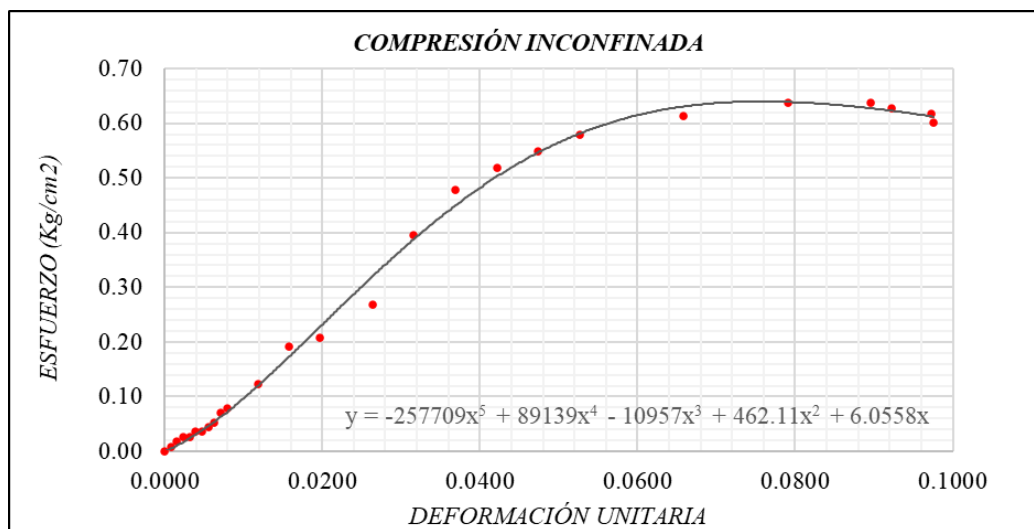
Gráfica 9. Diagrama de esfuerzo vs deformación de muestra Shelby - Suelo - Buenaventura (a)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Datos del ensayo de RCI de muestras Shelby - Suelo - Buenaventura (b).

DEFORMACIÓN (0.001")	DEFORMACIÓN UNITARIA ($\Delta H/H$)	LECTURA DE CARGA (0.0001")	CARGA (Kg)	AREA CORREGIDA (cm ²)	ESFUERZO (Kg/cm ²)
0	0.0000	0	0.000	16.403	0.00
3	0.0008	1	0.146	16.416	0.01
6	0.0016	2	0.291	16.429	0.02
9	0.0024	3	0.437	16.442	0.03
12	0.0032	3	0.437	16.455	0.03
15	0.0040	4	0.582	16.468	0.04
18	0.0047	4	0.582	16.481	0.04
21	0.0055	5	0.728	16.494	0.04
24	0.0063	6	0.873	16.507	0.05
27	0.0071	8	1.164	16.521	0.07
30	0.0079	9	1.310	16.534	0.08
45	0.0119	14	2.037	16.600	0.12
60	0.0158	22	3.201	16.666	0.19
75	0.0198	24	3.492	16.734	0.21
100	0.0263	31	4.511	16.847	0.27
120	0.0316	46	6.693	16.939	0.40
140	0.0369	56	8.148	17.031	0.48
160	0.0422	61	8.876	17.125	0.52
180	0.0474	65	9.458	17.220	0.55
200	0.0527	69	10.040	17.315	0.58
250	0.0659	74	10.767	17.560	0.61
300	0.0790	78	11.349	17.811	0.64
340	0.0896	79	11.495	18.017	0.64
350	0.0922	78	11.349	18.069	0.63
369	0.0972	77	11.204	18.170	0.62
370	0.0975	75	10.913	18.175	0.60

Fuente: Elaboración propia.

**RESISTENCIA MÁXIMA = 0.64 Kg/cm²**

Gráfica 10. Diagrama de esfuerzo vs deformación de muestras Shelby - Suelo - Buenaventura (b).

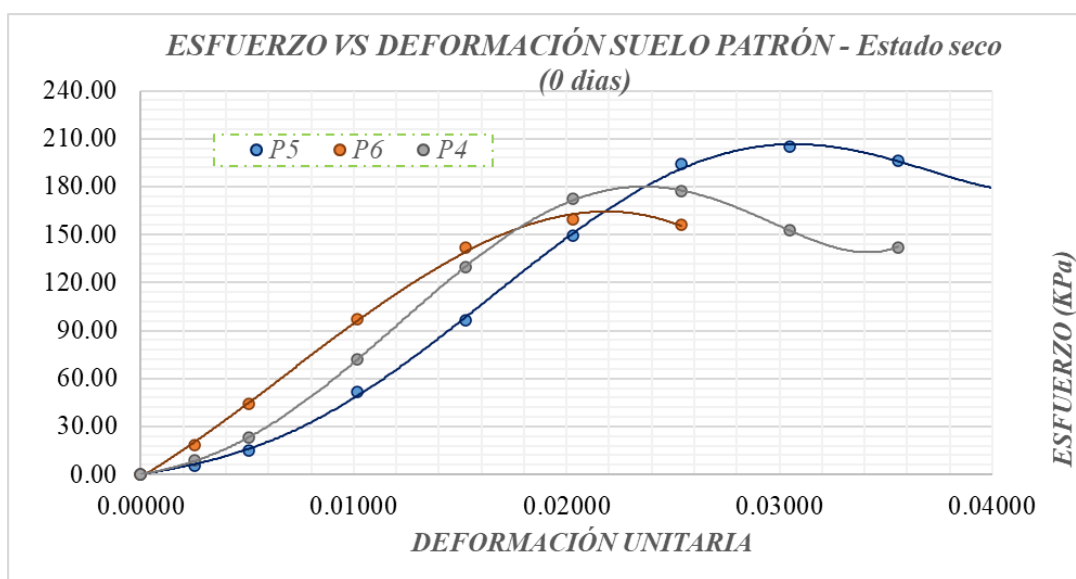
Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, en las Tabla 24 Tabla 25, como en la Gráfica 11, se puede observar los resultados del ensayo de resistencia a la compresión inconfiada para muestras de suelo compactadas en laboratorio, donde se obtuvo que, para condiciones secas, el valor de resistencia máxima es de 180kPa y que, para condiciones húmedas, el suelo no soporta ningún tipo de cargas.

Tabla 24. Datos del ensayo de RCI de muestra compactada en laboratorio (Estado seco) - Suelo - Buenaventura

TABLA DE RESUMEN RESISTENCIA MÁXIMA - q_u			
N°	PROBETA	DEFROMACIÓN UNITARIA	RESISTENCIA (Kpa)
1	P4	0.02540	177.06
2	P5	0.03048	205.02
3	P6	0.02032	159.47
PROMEDIO DE RESISTENCIA (Kpa)			180.52

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 11. Diagrama de esfuerzo vs deformación de muestra compactada en laboratorio - Suelo - Buenaventura

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Datos del ensayo de RCI de muestra compactada en laboratorio (Estado saturado) - Suelo - Buenaventura

TABLA DE RESUMEN RESISTENCIA MÁXIMA - q_u - Suelo patrón (Saturado)			
N°	PROBETA	DEFROMACIÓN UNITARIA	RESISTENCIA (Kpa)
1	P1	NO SOPORTARON PROCESOS DE SATURACIÓN	
2	P2		
3	P3		
PROMEDIO DE RESISTENCIA (Kpa)			0.00

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Mezclas de suelo estabilizadas con diferentes porcentajes de ceniza de cáscara de coco

A continuación, se muestran los resultados y discusiones sobre las diferentes etapas del diseño de las mezclas óptimas de suelo con ceniza de cáscara de coco.

5.3.1. Límites de Atterberg

Inicialmente, se estudió el efecto de la dosificación de la ceniza de cáscara de coco y el comportamiento plástico que el suelo obtiene al ser estabilizado.

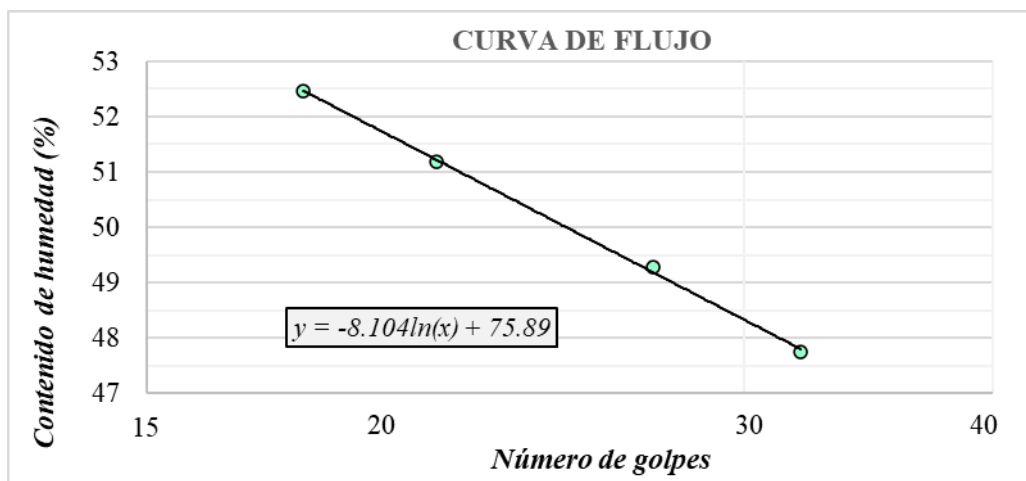
Ceniza de cáscara de coco (3%)

Los límites de Atterberg para la mezcla de suelo con 3% de ceniza de cáscara de coco se encuentran en la Tabla 26 y la Gráfica 12.

Tabla 26. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (3%).

Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	50
	Límite plástico (%)	24
	Índice de plasticidad (%)	26
CLASIFICACIÓN SUCS		CL

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 12. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (3%).

Fuente: Elaboración propia.

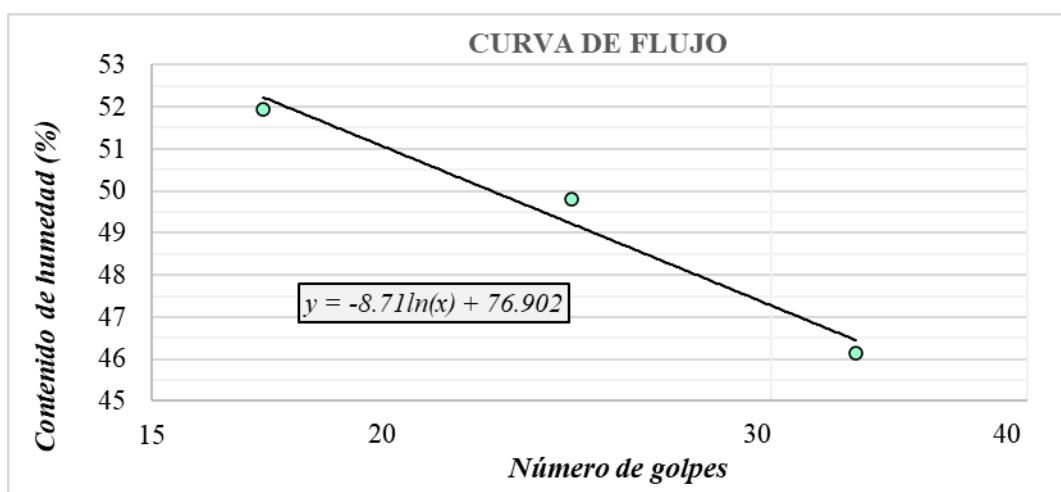
Ceniza de cáscara de coco (7%)

Los límites de Atterberg para la mezcla de suelo con 7% de ceniza de cáscara de coco se encuentran en la Tabla 27 y la Gráfica 13.

Tabla 27. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (7%).

Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	49
	Límite plástico (%)	22
	Índice de plasticidad (%)	27
CLASIFICACIÓN SUCS		CL

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 13. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (7%).

Fuente: Elaboración propia.

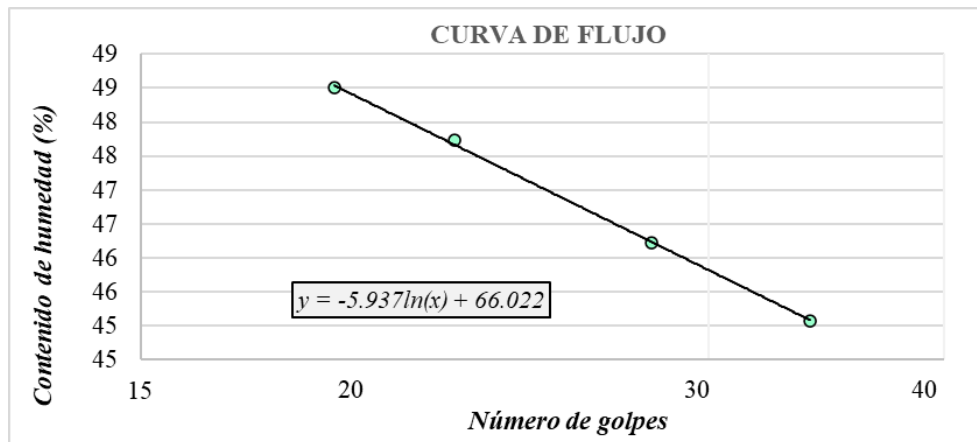
Ceniza de cáscara de coco (12%)

Los límites de Atterberg para la mezcla de suelo con 12% de ceniza de cáscara de coco se encuentran en la Tabla 27 y la Gráfica 14.

Tabla 28. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (12%).

Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	47
	Límite plástico (%)	23
	Índice de plasticidad (%)	24
CLASIFICACIÓN SUCS		CL

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 14. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (12%).

Fuente: Elaboración propia.

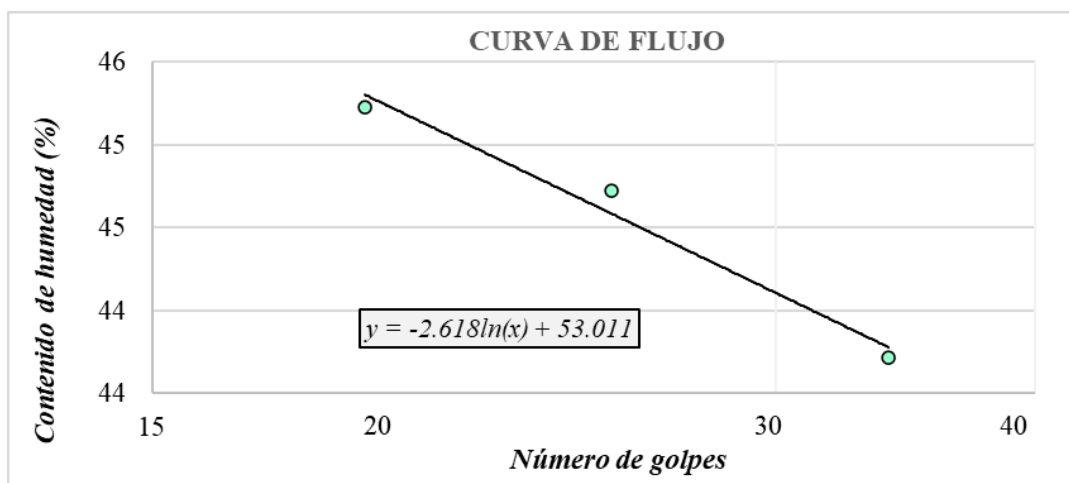
Ceniza de cáscara de coco (15%)

Los límites de Atterberg para la mezcla de suelo con 3% de ceniza de cáscara de coco se encuentran en la Tabla 29 y la Gráfica 15.

Tabla 29. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (15%).

Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	45
	Límite plástico (%)	25
	Índice de plasticidad (%)	20
CLASIFICACIÓN SUCS		CL

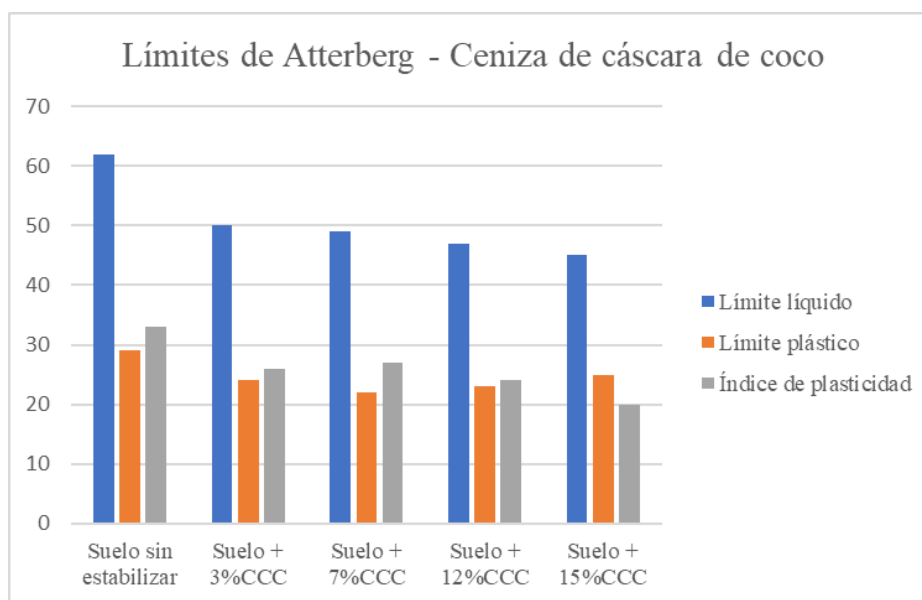
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 15. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (15%).

Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 16. Comparación de los límites de Atterberg para las mezclas de suelo con ceniza de cáscara de coco. se evidencia el comportamiento de los límites de Atterberg del suelo estabilizado con los diferentes porcentajes de ceniza de cáscara de coco con respecto a los límites para el suelo en estado natural con estabilizante, con respecto a la muestra de suelo sin estabilizar.



Gráfica 16. Comparación de los límites de Atterberg para las mezclas de suelo con ceniza de cáscara de coco.

Fuente: Elaboración propia.

Así, se observa el efecto de la dosificación de ceniza en las diferentes proporciones sobre la plasticidad del suelo. La muestra de suelo sin estabilizar posee un límite líquido del 62%, un límite plástico de 29% y un índice de plasticidad de 33% y, a medida que el suelo contiene mayor cantidad de ceniza, se observa una reducción considerable de la plasticidad pues se llegan a obtener valores de 45% para el límite líquido, 25% para el límite plástico y 20% para el índice de plasticidad, para un suelo con adición de ceniza de cáscara de coco del 15%.

En esta etapa de la investigación se observó que la reacción entre el suelo y la ceniza de cáscara de coco puede eliminar el efecto de plasticidad en el suelo, esto se evidencia en el cambio de clasificación del suelo, pues este en su estado natural se clasifica como una arcilla de alta plasticidad y, al agregarle la ceniza de cáscara de coco, se convierte en una arcilla de baja plasticidad. Todo lo anterior implica una estructura más estable.

5.3.2. Potencial de expansión en el aparato de Lambe

A continuación, se muestran los resultados y discusiones sobre el potencial expansivo que poseen las mezclas de suelo con ceniza de cáscara de coco.

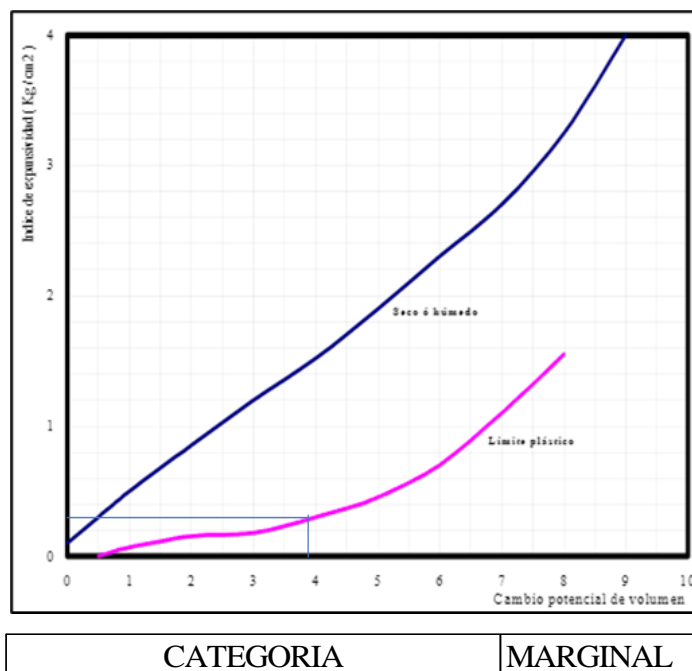
Ceniza de cáscara de coco (3%)

Los datos para la determinación del potencial de expansión para la mezcla de suelo con 3% de ceniza de cáscara de coco se encuentran en la Tabla 30 y la Gráfica 17.

Tabla 30. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (3%).

ESTADOS DE LA MUESTRA	ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO	TIEMPO (min)	LECTURA DIAL (0.0001")	PRESION (kg/cm ²)
			1	0	0.00
Diámetro (cm)	7	7	2	1	0.04
Altura (cm)	1.6	1.6	3	2	0.08
Peso anillo + suelo húmedo (g)	344.5	354.2	4	3	0.12
Peso anillo + suelo seco (g)	325.4	325.1	5	3	0.12
Peso anillo (g)	241.8	241.8	10	5	0.20
Peso de sólidos (g)	83.6	83.3	15	6	0.24
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.67	1.83	30	8	0.33
Densidad seca (g/cm ³)	1.36	1.35	60	8	0.33
Humedad (%)	23	34.9	90	8	0.33
			120	8	0.33

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 17. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (3%).

Fuente: Elaboración propia.

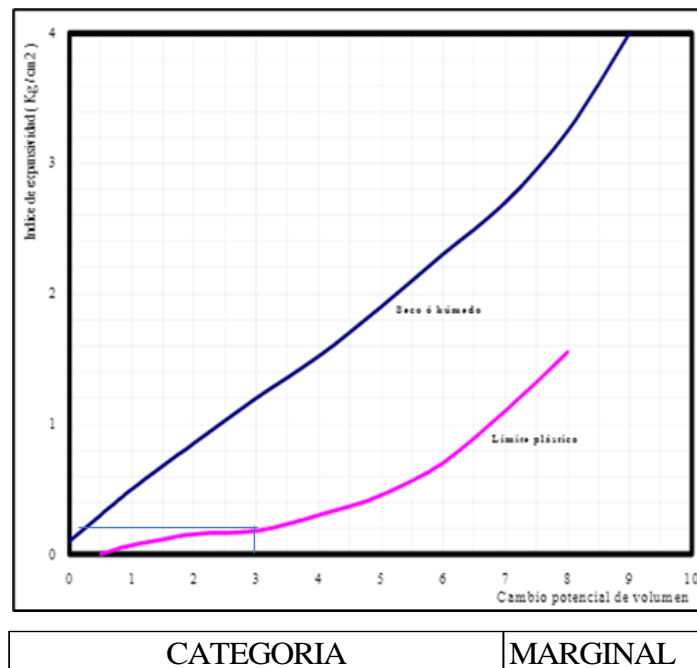
Ceniza de cáscara de coco (7%)

Los datos para la determinación del potencial de expansión para la mezcla de suelo con 3% de ceniza de cáscara de coco se encuentran en la Tabla 31 y la Gráfica 18

Tabla 31. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (7%).

ESTADOS DE LA MUESTRA	ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO	TIEMPO	LECTURA	PRESION
			(min)	DIAL (0.0001")	(kg/cm ²)
			1	0	0.00
			2	1	0.04
			3	1	0.04
			4	2	0.08
			5	2	0.08
			10	4	0.16
			15	5	0.20
			30	6	0.24
			60	6	0.24
			90	6	0.24
			120	6	0.24
Diámetro (cm)	7	7			
Altura (cm)	1.6	1.6			
Peso anillo + suelo húmedo (g)	342.8	354.9			
Peso anillo + suelo seco (g)	324.5	324.2			
Peso anillo (g)	241.8	241.8			
Peso de sólidos (g)	82.7	82.4			
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.64	1.84			
Densidad seca (g/cm ³)	1.34	1.34			
Humedad (%)	22.1	37.2			

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 18. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (7%).

Fuente: Elaboración propia.

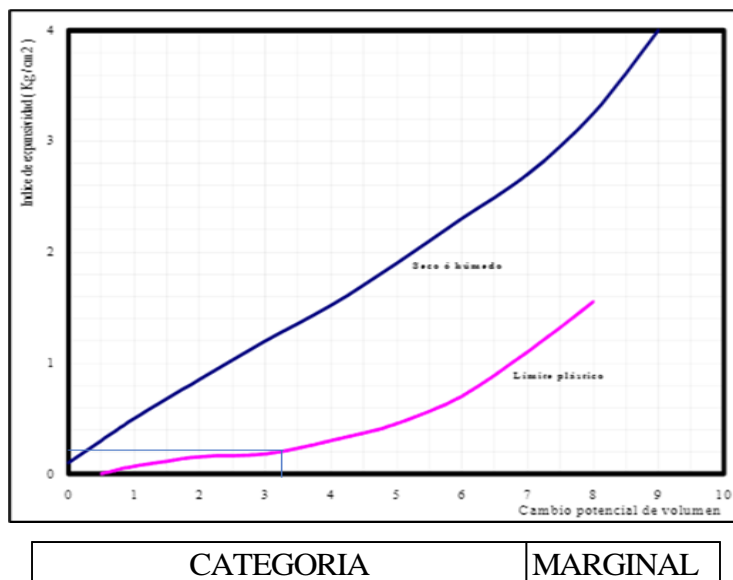
Ceniza de cáscara de coco (12%)

Los datos para la determinación del potencial de expansión para la mezcla de suelo con 3% de ceniza de cáscara de coco se encuentran en la Tabla 32 y la Gráfica 19.

Tabla 32. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (12%).

ESTADOS DE LA MUESTRA	ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO	TIEMPO (min)	LECTURA DIAL (0.0001")	PRESION (kg/cm ²)
Diámetro (cm)	7	7	1	0	0.00
Altura (cm)	1.6	1.6	2	1	0.04
Peso anillo + suelo húmedo (g)	342.2	352.7	3	1	0.04
Peso anillo + suelo seco (g)	322.5	322.7	4	2	0.08
Peso anillo (g)	241.8	241.8	5	3	0.12
Peso de sólidos (g)	80.7	80.9	10	4	0.16
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.63	1.80	15	4	0.16
Densidad seca (g/cm ³)	1.31	1.31	30	5	0.20
Humedad (%)	24	37.1	60	6	0.24
			90	6	0.24
			120	6	0.24

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 19. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (12%).

Fuente: Elaboración propia.

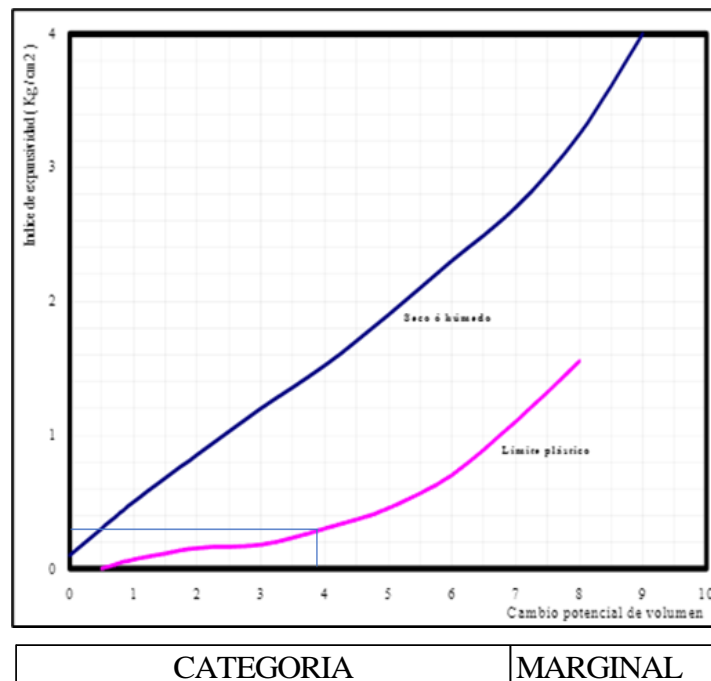
Ceniza de cáscara de coco (15%)

Los datos para la determinación del potencial de expansión para la mezcla de suelo con 3% de ceniza de cáscara de coco se encuentran en la Tabla 33 y la Gráfica 20.

Tabla 33. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (15%).

ESTADOS DE LA MUESTRA	ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO	TIEMPO (min)	LECTURA DIAL (0.0001")	PRESION (kg/cm ²)
Diámetro (cm)	7	7	1	0	0.00
Altura (cm)	1.6	1.6	2	2	0.08
Peso anillo + suelo humedo (g)	345.5	353.3	3	3	0.12
Peso anillo + suelo seco (g)	325.3	325.4	4	4	0.16
Peso anillo (g)	241.8	241.8	5	5	0.20
Peso de sólidos (g)	83.5	83.6	10	6	0.24
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.68	1.81	15	7	0.29
Densidad seca (g/cm ³)	1.36	1.36	30	9	0.37
Humedad (%)	24	33.4	60	9	0.37
			90	9	0.37
			120	9	0.37

Fuente: Elaboración propia.



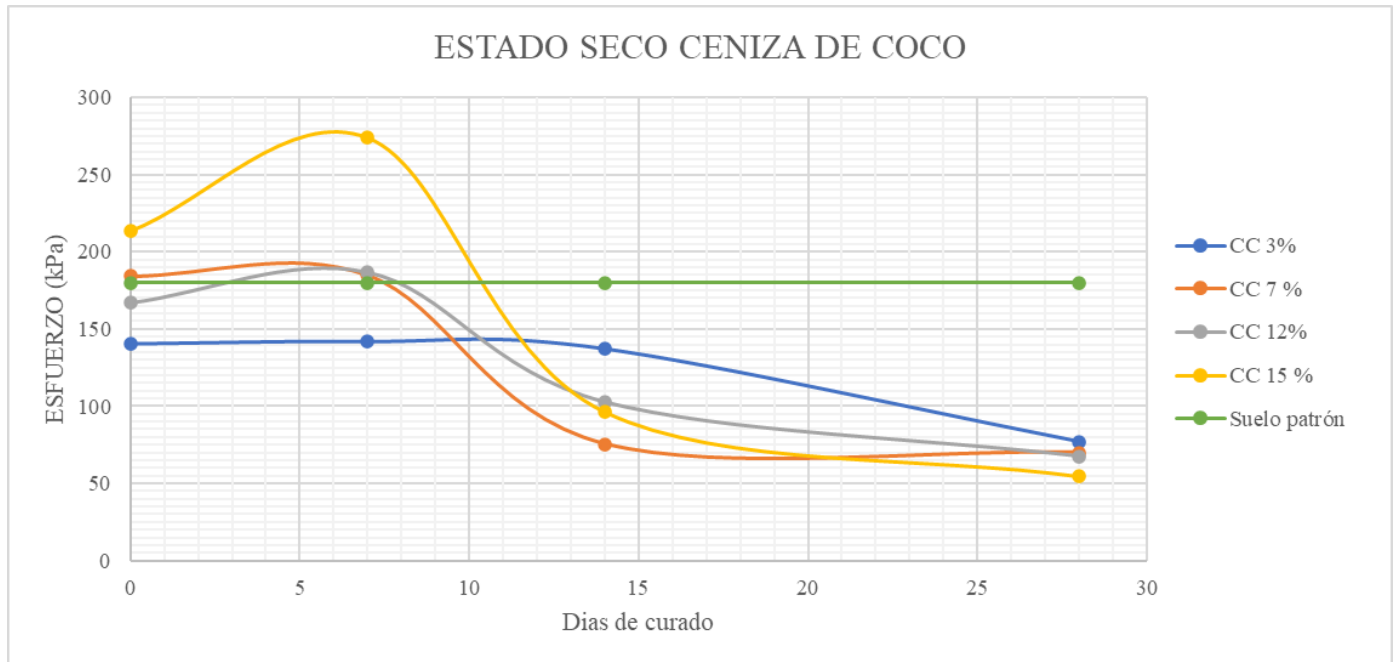
Gráfica 20. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de coco (15%).

Fuente: Elaboración propia.

De la información obtenida en las gráficas Gráfica 17 Gráfica 18 Gráfica 19 Gráfica 20 y las tablas Tabla 30 Tabla 31 Tabla 32 Tabla 33 del ensayo para determinar el potencial de expansividad en el suelo, se puede observar que se reduce considerablemente el cambio volumétrico del suelo al adicionarle ceniza de cáscara de coco en casi un 50%, por lo que es posible afirmar que la ceniza de cáscara de coco es un material potencial para la eliminación de la expansión y contracción de los suelos, específicamente para el suelo arcilloso de alta plasticidad, característico del distrito de Buenaventura.

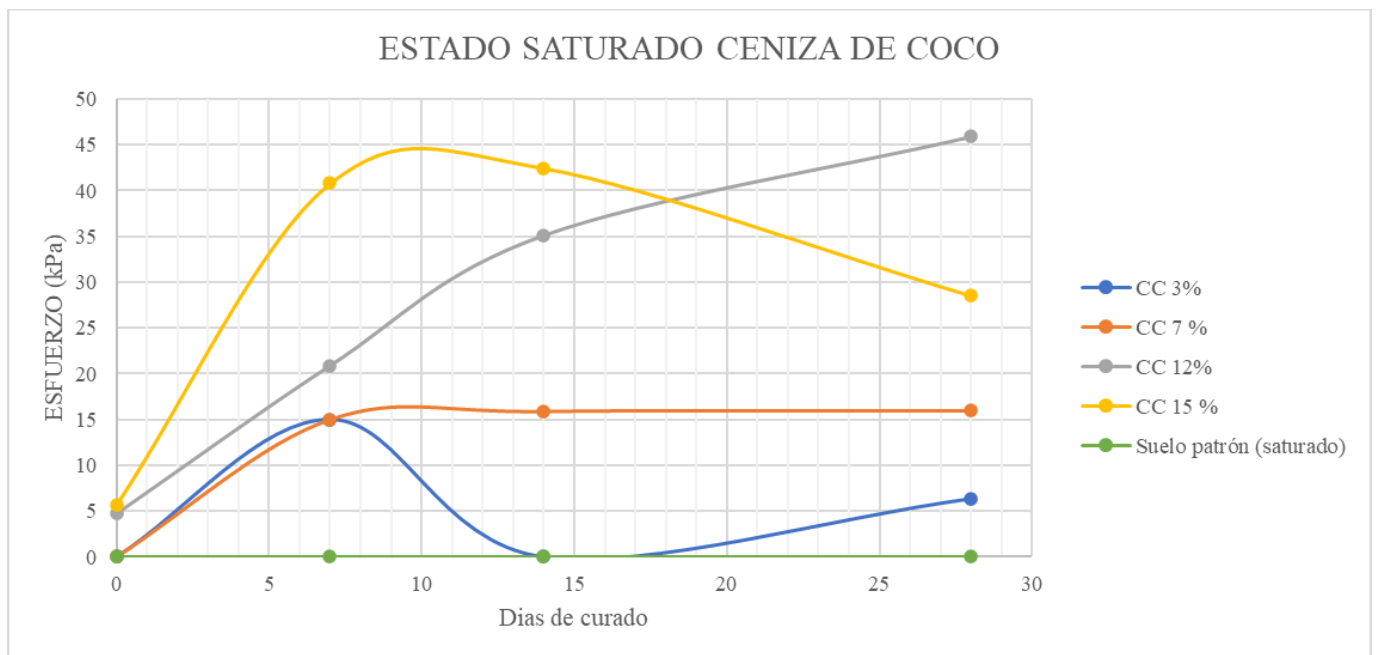
5.3.3. Resistencia a la compresión inconfiada

En la Gráfica 21 se observa el efecto de la dosificación de ceniza en las diferentes proporciones sobre la resistencia para condiciones secas. En ella, la resistencia del suelo estabilizado con algunos de los porcentajes de ceniza es, inicialmente, mayor al valor de resistencia del suelo en estado natural (180 kPa). Sin embargo, a medida que el tiempo de curado va incrementando, se observa una disminución en la resistencia, pues para los 21 días de curado se obtiene una resistencia menor a la del suelo en estado natural. En la Gráfica 22 se observa el efecto de la dosificación de ceniza en las diferentes proporciones sobre la resistencia para condiciones húmedas. De esta, se puede comprobar que, la presencia de agua en el suelo en estado natural genera resultados poco favorables ya que no soporta cargas al estar saturado. Sin embargo, al adicionarle ceniza de cáscara de coco, el suelo confiere estabilidad al agua, logrando resistir cargas, a pesar de ser pocas. De lo anterior cabe resaltar que a medida que aumenta el tiempo de curado, el suelo estabilizado para un porcentaje de adición del 12% va ganando nuevamente resistencia, siendo el que mejores resultados presenta, por lo que, la ceniza es un potencial aditivo para que el suelo se comporte de manera más resistente cuando existe presencia de agua.



Gráfica 21. Resistencia a la compresión inconfiada de suelo estabilizado con diferentes porcentajes de ceniza de cáscara de coco a 0, 7, 14 y 28 días - Estado seco.

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 22. Resistencia a la compresión inconfiada de suelo estabilizado con diferentes porcentajes de ceniza de cáscara de coco a 0, 7, 14 y 28 días - Estado saturado.

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Mezclas de suelo estabilizadas con diferentes porcentajes de ceniza de concha de molusco

Ahora, se muestran los resultados y discusiones sobre las diferentes etapas del diseño de las mezclas óptimas de suelo con ceniza de concha de molusco.

5.4.1. Límites de Atterberg

Inicialmente, se estudió el efecto de la dosificación de la ceniza de cáscara de coco y el comportamiento plástico que el suelo obtiene al ser estabilizado.

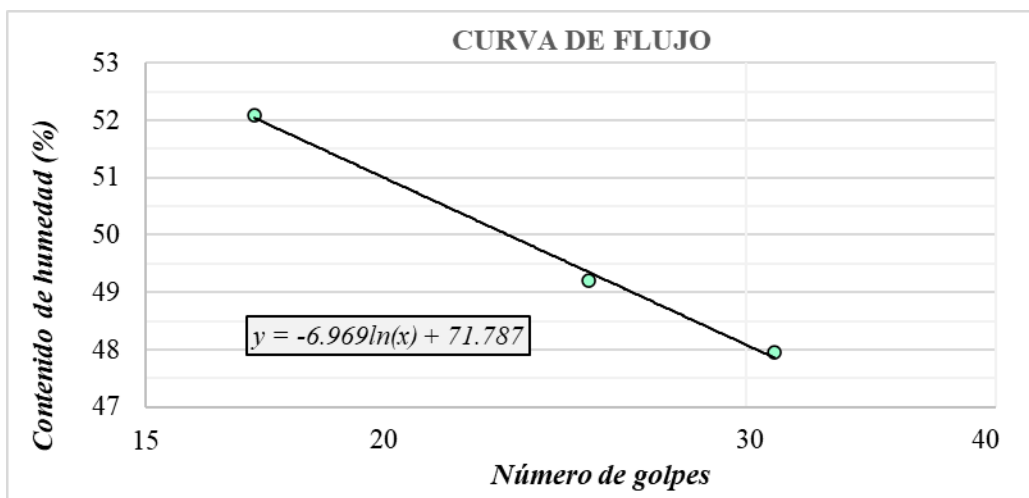
Ceniza de concha de molusco (2%)

Los límites de Atterberg para la mezcla de suelo con 2% de ceniza de concha de molusco se encuentran en la Tabla 34 y la Gráfica 23.

Tabla 34. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (2%).

<i>Límites de Atterberg</i>	Límite líquido (%)	40
	Límite plástico (%)	21
	Índice de plasticidad (%)	29
CLASIFICACIÓN SUCS		CL

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 23. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (2%).

Fuente: Elaboración propia.

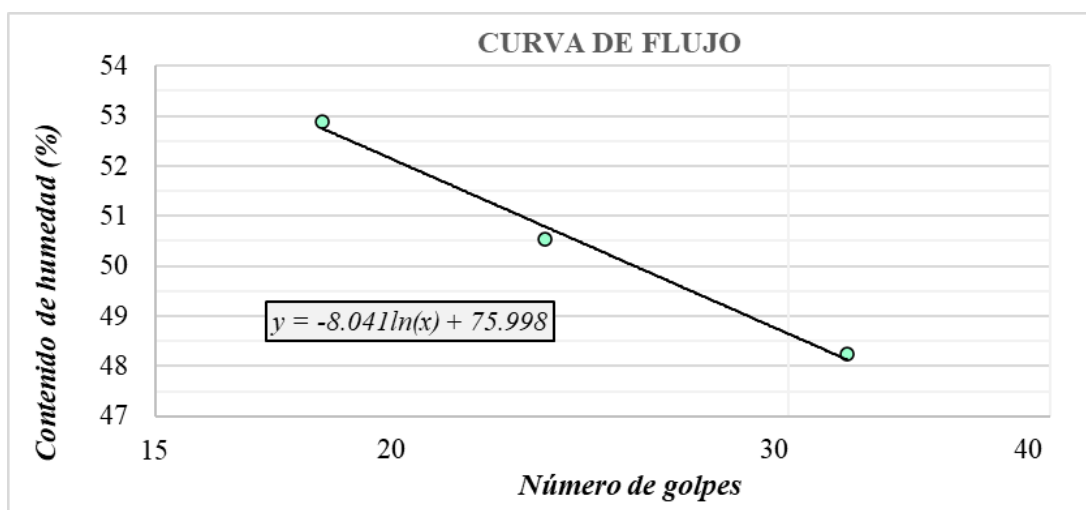
Ceniza de concha de molusco (4%)

Los límites de Atterberg para la mezcla de suelo con 4% de ceniza de concha de molusco se encuentran en la Tabla 35 y la Gráfica 24.

Tabla 35. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (4%).

Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	50
	Límite plástico (%)	22
	Índice de plasticidad (%)	28
CLASIFICACIÓN SUCS		CL

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 24. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (4%).

Fuente: Elaboración propia.

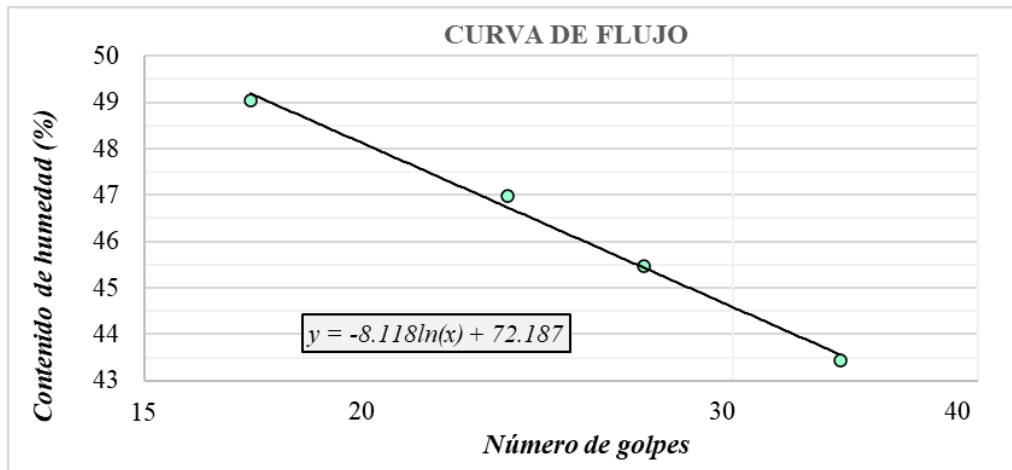
Ceniza de concha de molusco (7%)

Los límites de Atterberg para la mezcla de suelo con 7% de ceniza de concha de molusco se encuentran en la Tabla 36 y la Gráfica 25.

Tabla 36. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (7%).

Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	46
	Límite plástico (%)	21
	Índice de plasticidad (%)	25
CLASIFICACIÓN SUCS		CL

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 25. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (7%).

Fuente: Elaboración propia.

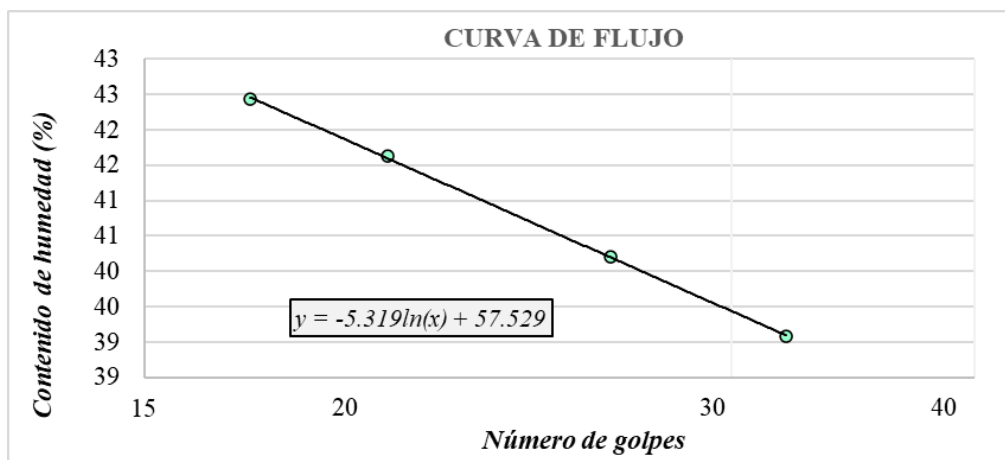
Ceniza de concha de molusco (10%)

Los límites de Atterberg para la mezcla de suelo con 4% de ceniza de concha de molusco se encuentran en la Tabla 37 y la Gráfica 26.

Tabla 37. Resultados de límites de Atterberg de suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (10%).

Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	40
	Límite plástico (%)	23
	Índice de plasticidad (%)	17
CLASIFICACIÓN SUCS		CL

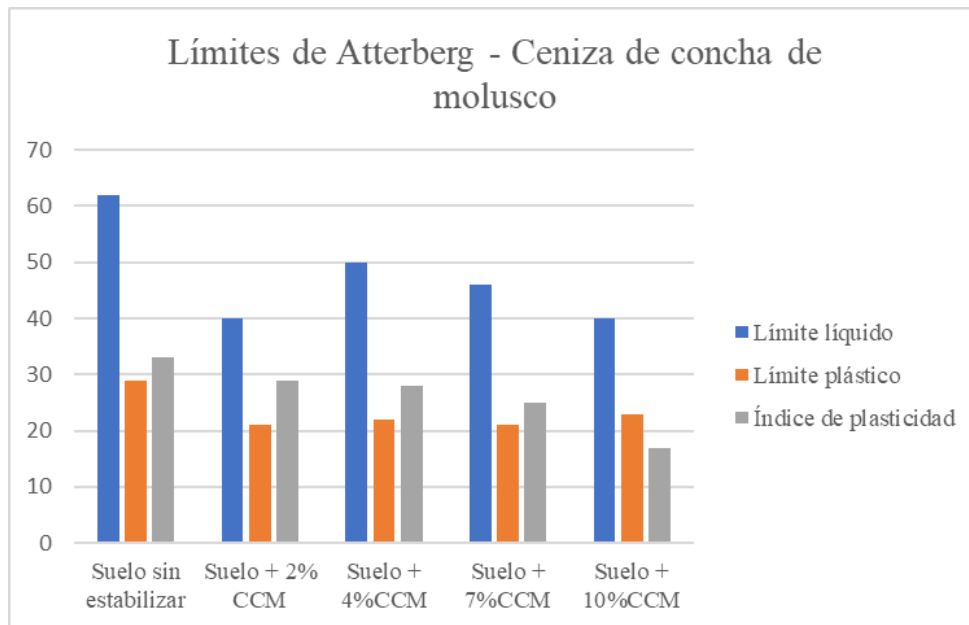
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 26. Diagrama de fluidez - Suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (10%).

Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 27. Comparación de los límites de Atterberg para las mezclas de suelo con ceniza de concha de molusco. Gráfica 16. Comparación de los límites de Atterberg para las mezclas de suelo con ceniza de cáscara de coco. se evidencia el comportamiento de los límites de Atterberg del suelo estabilizado con los diferentes porcentajes de ceniza de concha de molusco con respecto a los límites para el suelo en estado natural con estabilizante, con respecto a la muestra de suelo sin estabilizar.



Gráfica 27. Comparación de los límites de Atterberg para las mezclas de suelo con ceniza de concha de molusco.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar la incidencia de la ceniza de concha de molusco en los cambios en el índice de plasticidad y el límite líquido. Al igual que la ceniza de cáscara de coco, la ceniza de concha de molusco le brinda al suelo propiedades resistentes al agua, disminuyendo de manera considerable su plasticidad. Como se mencionó anteriormente, la muestra de suelo en estado natural posee un límite líquido del 62%, un límite plástico de 29% y un índice de plasticidad de 33% y, cuando el suelo es mezclado con ceniza, tanto el límite líquido, como el límite plástico y el índice de plasticidad se reducen considerablemente, llegando a valores de 40%, 23% y 17%, respectivamente, para una adición de ceniza del 10%. Al comparar los valores obtenidos con la ceniza de concha de molusco con respecto a la ceniza de cáscara de coco, se puede afirmar que la ceniza de concha de molusco es más efectiva en términos de eliminar la plasticidad, puesto que

disminuyó en mayor cantidad el índice de plasticidad y el límite líquido con menores cantidades de adición.

5.4.2. Potencial de expansión en el aparato de Lambe

A continuación, se muestran los resultados y discusiones sobre el potencial expansivo que poseen las mezclas de suelo con ceniza de concha de molusco.

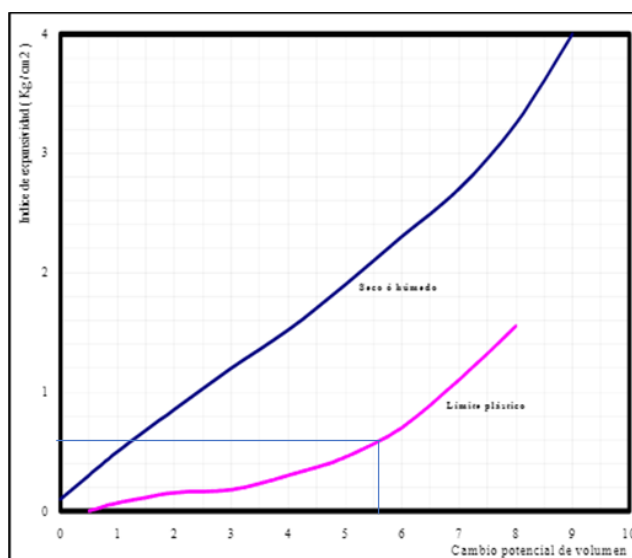
Ceniza de concha de molusco (2%)

Los datos para la determinación del potencial de expansión para la mezcla de suelo con 2% de ceniza de concha de molusco se encuentran en la Tabla 38 y la Gráfica 28.

Tabla 38. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (2%).

ESTADOS DE LA MUESTRA	ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO	TIEMPO (min)	LECTURA DIAL (0.0001")	PRESION (kg/cm ²)
Diámetro (cm)	7	7	1	0	0.00
Altura (cm)	1.6	1.6	2	3	0.12
Peso anillo + suelo húmedo (g)	340.4	354.3	3	5	0.20
Peso anillo + suelo seco (g)	323.5	323.4	4	6	0.24
Peso anillo (g)	241.8	241.8	5	8	0.33
Peso de sólidos (g)	81.7	81.6	10	9	0.37
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.60	1.83	15	12	0.49
Densidad seca (g/cm ³)	1.33	1.33	30	14	0.57
Humedad (%)	21	37.9	60	15	0.61
			90	15	0.61
			120	15	0.61

Fuente: Elaboración propia.



CATEGORIA	CRITICO
-----------	---------

Gráfica 28. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (2%).

Fuente: Elaboración propia

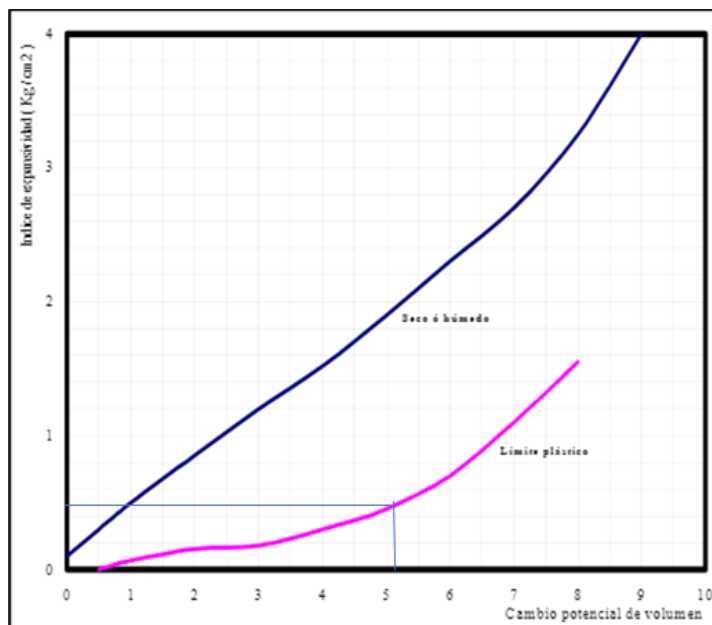
Ceniza de concha de molusco (4%)

Los datos para la determinación del potencial de expansión para la mezcla de suelo con 4% de ceniza de concha de molusco se encuentran en la Tabla 39 y la Gráfica 29.

Tabla 39. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (4%).

ESTADOS DE LA MUESTRA	ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO	TIEMPO (min)	LECTURA DIAL (0.0001")	PRESION (kg/cm ²)
Diámetro (cm)	7	7	1	0	0.00
Altura (cm)	1.6	1.6	2	0	0.00
Peso anillo + suelo humedo (g)	338.7	353.3	3	0	0.00
Peso anillo + suelo seco (g)	320.8	324.9	4	1	0.04
Peso anillo (g)	241.8	241.8	5	1	0.04
Peso de sólidos (g)	79.0	83.1	10	7	0.29
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.57	1.81	15	10	0.41
Densidad seca (g/cm ³)	1.28	1.35	30	12	0.49
Humedad (%)	22.7	34.2	60	12	0.49
			90	12	0.49
			120	12	0.49

Fuente: Elaboración propia.



CATEGORIA	CRITICO
-----------	---------

Gráfica 29. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (4%).

Fuente: Elaboración propia

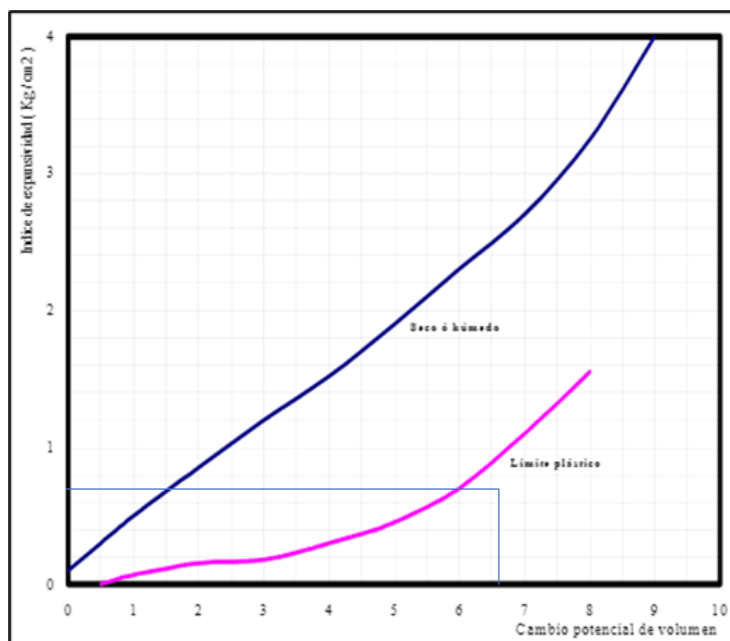
Ceniza de concha de molusco (7%)

Los datos para la determinación del potencial de expansión para la mezcla de suelo con 7% de ceniza de concha de molusco se encuentran en la Tabla 40 y la Gráfica 30.

Tabla 40. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (7%).

ESTADOS DE LA MUESTRA	ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO	TIEMPO	LECTURA	PRESION
			(min)	DIAL (0.0001")	(kg/cm2)
			1	0	0.00
			2	1	0.04
			3	2	0.08
			4	4	0.16
			5	7	0.29
			10	13	0.53
			15	16	0.65
			30	17	0.69
			60	17	0.69
			90	17	0.69
			120	17	0.69
Diámetro (cm)	7	7			
Altura (cm)	1.6	1.6			
Peso anillo + suelo húmedo (g)	340.5	354.2			
Peso anillo + suelo seco (g)	323.2	323.0			
Peso anillo (g)	241.8	241.8			
Peso de sólidos (g)	81.4	81.2			
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.60	1.83			
Densidad seca (g/cm ³)	1.32	1.32			
Humedad (%)	21	38.4			

Fuente: Elaboración propia.



CATEGORIA	MUY CRITICO
-----------	-------------

Gráfica 30. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (7%).

Fuente: Elaboración propia

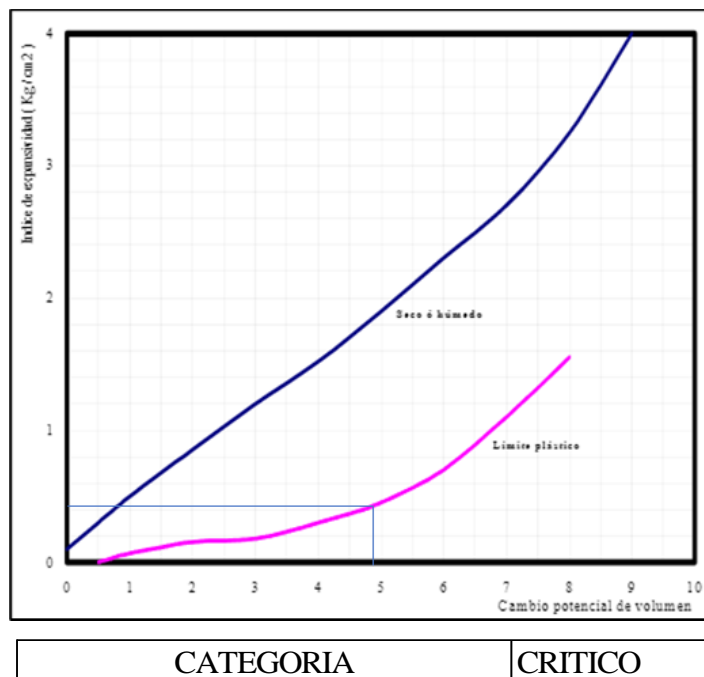
Ceniza de concha de molusco (10%)

Los datos para la determinación del potencial de expansión para la mezcla de suelo con 2% de ceniza de concha de molusco se encuentran en la Tabla 41 y la Gráfica 31.

Tabla 41. Datos de ensayo para determinar el potencial de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (10%).

ESTADOS DE LA MUESTRA	ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO	TIEMPO	LECTURA	PRESION
			(min)	DIAL (0.0001")	(kg/cm ²)
			1	0	0.00
			2	1	0.04
			3	3	0.12
			4	5	0.20
			5	6	0.24
			10	7	0.29
			15	9	0.37
			30	10	0.41
			60	10	0.41
			90	10	0.41
			120	10	0.41
Diámetro (cm)	7	7			
Altura (cm)	1.6	1.6			
Peso anillo + suelo humedo (g)	337.3	351.8			
Peso anillo + suelo seco (g)	319.4	319.5			
Peso anillo (g)	241.8	241.8			
Peso de sólidos (g)	77.6	77.7			
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.55	1.79			
Densidad seca (g/cm ³)	1.26	1.26			
Humedad (%)	23	42			

Fuente: Elaboración propia.



CATEGORIA

CRITICO

Gráfica 31. Índice de expansividad de Lambe para el suelo estabilizado con ceniza de concha de molusco (10%).

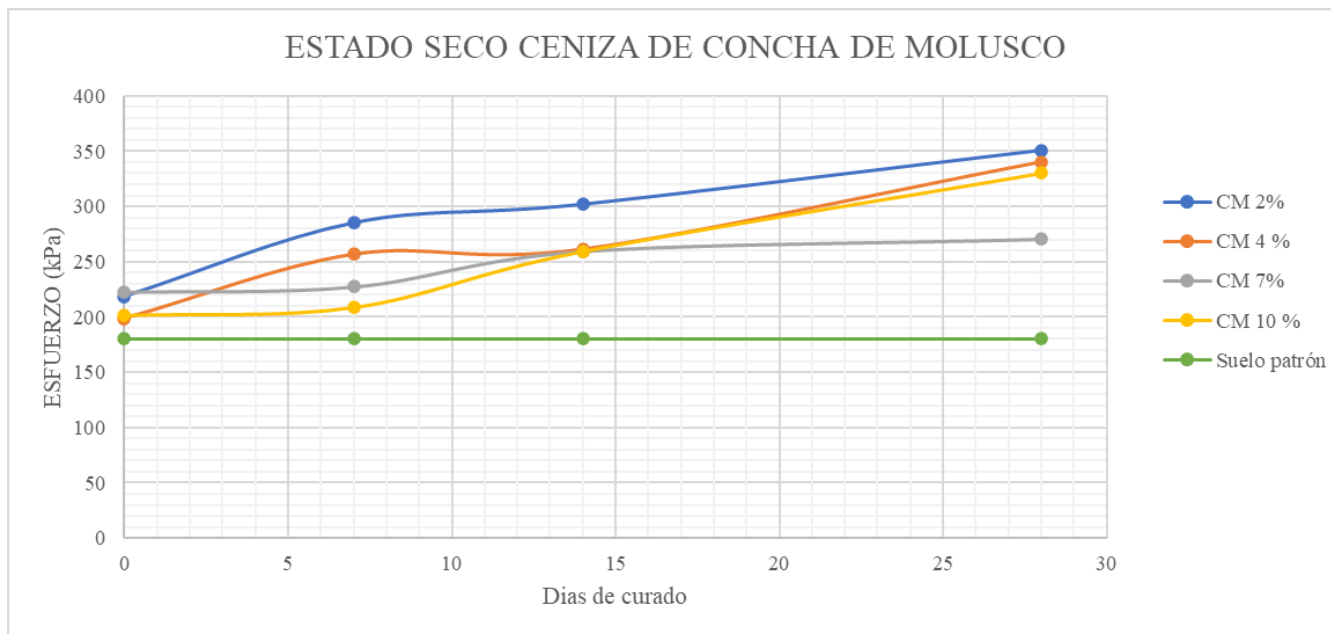
Fuente: Elaboración propia

De los valores obtenidos del ensayo para determinar el potencial de expansividad en el suelo, se puede observar que el efecto que tiene la ceniza de concha de molusco sobre el suelo no es significativo, pues el potencial de expansividad sigue siendo el mismo e incluso, para algunos porcentajes, llega a ser mayor. Esto quiere decir que la ceniza de concha de molusco es un aditivo que no tiene incidencia en la estabilización del suelo respecto a los cambios volumétricos que este puede llegar a sufrir.

5.4.3. Resistencia a la compresión inconfiada

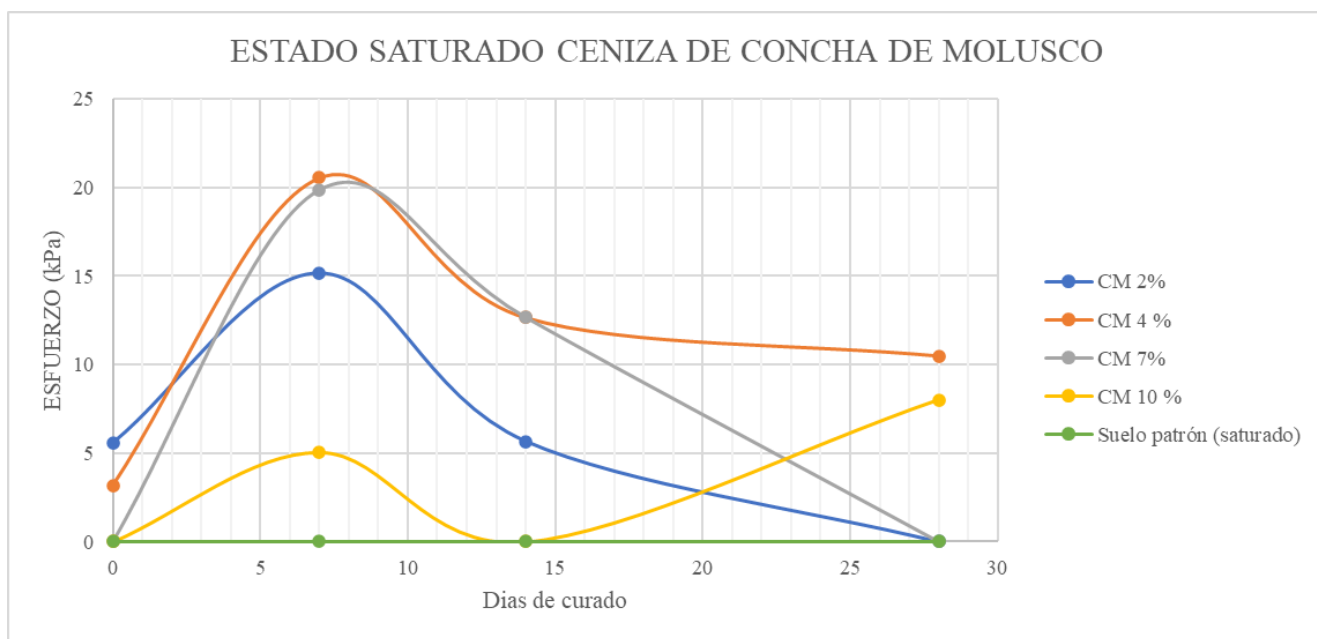
En la Gráfica 32 se puede observar la incidencia de la ceniza de concha de molusco sobre la resistencia del suelo en condiciones secas. Al mezclar la ceniza con el suelo a distintas dosificaciones, se identificó que este confiere mayor resistencia con respecto a la adquirida en condiciones naturales (180 kPa), además, se observa que, a medida que transcurre el tiempo, el suelo sigue aumentando su resistencia, siendo el porcentaje de adición de 2% aquel con mejores resultados, llevando a una resistencia de 350kPa.

En la Gráfica 33 se observa el comportamiento de la resistencia del suelo estabilizado con los distintos porcentajes de ceniza, para condiciones de saturación por capilaridad en el suelo, donde se observa que, para el suelo en estado natural, es decir, sin estabilizante, no soporta ningún tipo de carga y, al adicionarle la ceniza de concha de molusco, se presenta un incremento de la resistencia al soportar cargas, donde se presenta una tendencia de aumento de resistencia conforme van pasando los días, para un porcentaje de adición de ceniza de concha de molusco del 4% y 10%. Lo anterior puede implicar que la ceniza de concha de molusco le confiere resistencia al suelo en condiciones húmedas y, por lo tanto, genera una estabilidad al agua, la cual se va consolidando al paso del tiempo.



Gráfica 32. Resistencia a la compresión inconfiada de suelo estabilizado con diferentes porcentajes de ceniza de concha de molusco a 0, 7, 14 y 28 días - Estado seco.

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 33. Resistencia a la compresión inconfiada de suelo estabilizado con diferentes porcentajes de ceniza de concha de molusco a 0, 7, 14 y 28 días - Estado saturado.

Fuente: Elaboración propia.

5.5. Ensayo CBR sobre la mezcla de suelo con estabilizante que ha presentado los mejores resultados.

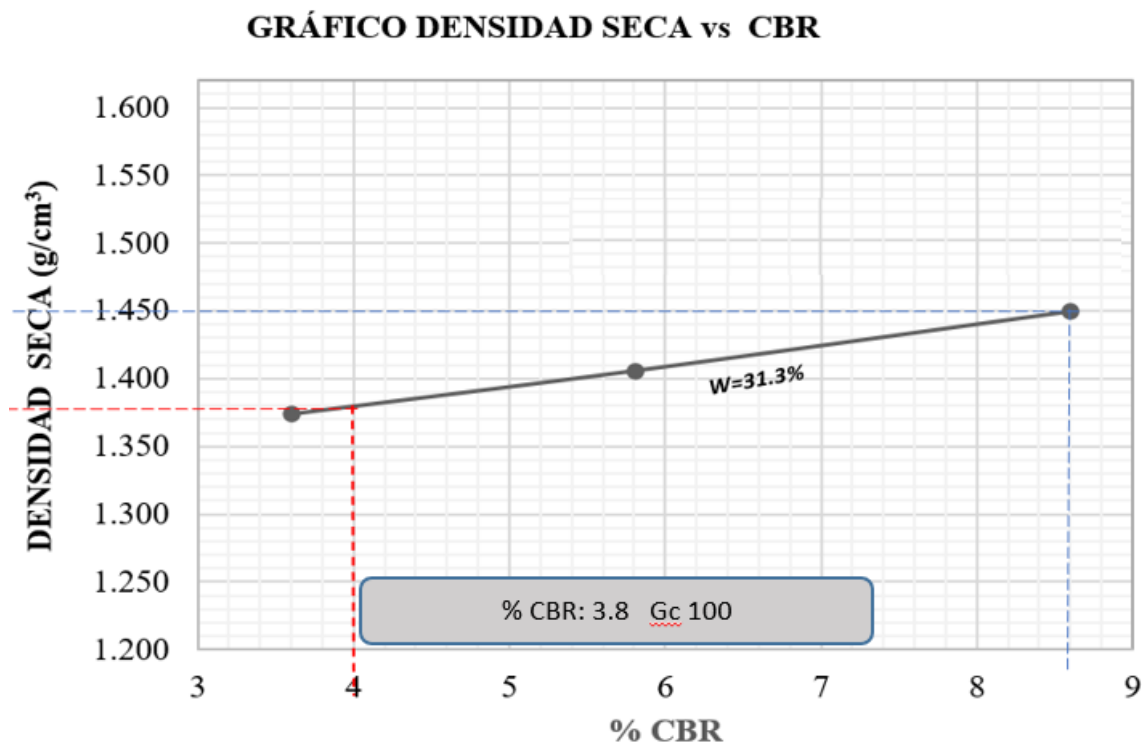
Posterior a la realización de los ensayos de límites de consistencia, expansión en el aparato de Lambe y resistencia a la compresión inconfiada en el suelo estabilizado con los distintos porcentajes de ceniza, tanto de cáscara de coco como de concha de molusco; se determinó que, el material estabilizante que mejor reacciona con el suelo es la ceniza de concha de molusco, tanto para condiciones secas como húmedas y que, para un porcentaje de adición del 2% del peso seco de la muestra se presentan los mejores resultados. De igual manera, se determinó para la mezcla de suelo con ceniza de cáscara de coco, al ser tan variables sus resultados, se determinó que, para este estabilizante, el porcentaje de adición debe ser mayor y por ello no se involucró para evaluar el CBR.

De lo anterior, se decidió realizar el ensayo CBR para la mezcla de suelo con ceniza de concha de molusco con los parámetros mencionados y se obtuvieron los resultados que se observan en la Tabla 42 y la Gráfica 34.

Tabla 42. Datos del ensayo CBR de la mezcla de suelo con ceniza de concha de molusco (2%)

RESUMEN DE DATOS - CBR - Suelo CH + 2% CCM				
Muestra	1	2	3	4
%CBR 10G	1.8	2.6	4.1	3.2
%CBR 25G	1.8	2.5	3.3	3.0
%CBR 56G	7.1	2.3	5.2	5.2
%EXPAN 10G	4.43	3.80	2.20	0.55
%EXPAN 25G	5.58	3.51	3.77	1.51
%EXPAN 56G	7.50	6.78	3.12	1.16
γ_D 10G (g/cm³)	1.350	1.381	1.376	1.342
γ_D 25G (g/cm³)	1.423	1.457	1.456	1.389
γ_D 56G (g/cm³)	1.548	1.594	1.578	1.494
% W 10G	19.9	23.2	30.4	34.4
%W 25G	15.868	19.746	26.013	31.916
% W 56G	12.408	14.804	24.036	29.403
γ_D (g/cm³)	1.374	1.406	1.450	
CBR (%)	3.6	5.8	8.6	

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 34. Gráfica de Densidad seca vs CBR de la mezcla de suelo con ceniza de concha de molusco (2%).

Fuente: Elaboración propia.

De la Gráfica 8 con respecto a la Gráfica 34, se puede evidenciar que el porcentaje de humedad óptimo aumentó al agregarle la ceniza de concha de molusco y disminuyó la densidad seca máxima. Además, se observó que para un grado de compactación del 95%, se obtuvo un CBR de menor valor, disminuyendo casi en un 50%. Sin embargo, para el grado de compactación del 100% si se evidenció un aumento en la capacidad portante del suelo, pues pasó a ser de un 7.4% a un 8.6% al agregarle la ceniza de concha de molusco.

Así, conforme a los antecedentes de esta investigación y a los resultados obtenidos de CBR, se puede observar que podría ser factible, el estudio de la incorporación de la ceniza de concha de molusco en porcentajes menores a los considerados en este trabajo.

6. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos y del análisis realizado, se puede concluir:

- El suelo proveniente del distrito de Buenaventura, el cual se encuentra comúnmente en la región, fue clasificado como un suelo arcilloso de alta plasticidad, según la clasificación SUCS. Dicho suelo posee una alta probabilidad de tener problemas de expansión y contracción.
- El efecto de dosificación de ceniza de cáscara de coco y ceniza de concha de molusco presentan variaciones en la plasticidad del suelo. Lo anterior se evidencia en las mediciones de los límites líquido y plástico, los cuales disminuyen al adicionarle el aditivo al suelo, indicando así, que es un material estabilizante potencial para eliminar la plasticidad en los suelos, disminuyendo los problemas en los cambios volumétricos, generando mayor seguridad a la hora de construir sobre estos.
- El proceso de estabilización mediante la dosificación de ceniza de cáscara de coco en la resistencia no es significativo, tendiendo a ser desfavorable, en especial para condiciones húmedas.
- La adición de cenizas de concha de molusco incrementó la resistencia del suelo, lo cual indica que posee una actividad puzolánica importante que permite generar una estructura rígida. Esto debido al incremento en la resistencia a la compresión confinada que se dio en las diferentes dosificaciones, siendo la dosificación del 2% la que presentó los mayores valores, puesto el suelo en estado natural logra una resistencia 180kPa, y al adicionarle ceniza de concha de molusco logró alcanzar, para los 28 días de curado, una resistencia de 350kPa.
- Los resultados del ensayo CBR que se realizó para el porcentaje óptimo de Suelo CH con adición de ceniza de concha de molusco (2%), comparado con la capacidad portante del suelo patrón CH en estado natural es aproximadamente igual para un grado de compactación del 100% del Proctor estándar, pues su valor prácticamente fue el mismo presentando un leve decremento de 4,1% a un 3,8%.
- Los materiales estabilizantes alternativos pueden generar diversos beneficios, tanto ambientales, como rentables y sostenibles pues cuentan con un comportamiento potencialmente puzolánico y, por lo tanto, se pueden emplear en la estabilización de suelos de subrasante.

7. Recomendaciones

- Estudiar el efecto de la concha de molusco en distintas áreas de la construcción como un agregado o material de aporte, pues este posee características que pueden conferir dureza, durabilidad y resistencia a dichos procesos constructivos.
- Realizar dosificaciones distintas de ceniza de cáscara de coco a las realizadas en el estudio, para conocer aún más el comportamiento como estabilizador en la subrasante ante dichos porcentajes.
- Se debe considerar el estudio de la incorporación de la ceniza de concha de molusco en porcentajes menores a los considerados en este trabajo.
- Evaluar el comportamiento que puede llegar a tener una estabilización de suelos con distintas propiedades y características distintas al evaluado en la presente investigación.
- Estudiar el efecto de la combinación de la ceniza de cáscara de coco y la ceniza de concha de molusco en el proceso estabilizante.

8. Bibliografía

- Alcaldía Distrital de Buenaventura. (2021). *Generación y disposición de residuos sólidos - Distrito de Buenaventura*.
- Andriani, R., & Permana, D. (2021). Utilization of Coconut Shell Charcoal to Improve Bearing Capacity of Clay as Subgrade for Road Pavement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 832(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/832/1/012041>
- Apac Jesus, J. S. (2020). *Estabilización de suelos blandos con valva de conchas de abanico para la subrasante tramo 0+0.6 km Cañete 2020* [Universidad César Vallejo].
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/50737/Cusma_GM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Barragán Muñoz, J. M. (2010). Manejo Costero Integrado y Política Pública en Iberoamérica: Un diagnóstico. Necesidad de cambio. In *Manejo Costero Integrado y Política Pública en Iberoamérica: Un diagnóstico. Necesidad de Cambio*. (Issue October). Red IBERMAR (CYTED).
- Briceño Valero, A. (2018). *ANÁLISIS DEL CORREDOR VIAL BUENAVENTURA-BOGOTÁ , COMO FACTOR DE BUENAVENTURA- BOGOTÁ , AS A*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Castañeda Granda, D. (2017). *Análisis de la granulometría de la concha de abanico triturada para su uso como agregado en concretos*. Universidad de Piura.
- Cobos Molina, M. A., Ortegón Ramirez, C. T., & Peralta Zarrate, J. C. (2019).

Caracterización del comportamiento geotécnico de suelos de origen volcánico estabilizados con cenizas provenientes de cáscara de coco y cisco de café. Universidad Cooperativa de Colombia.

Espinoza Eusebio, T. D., & Honores Tantalean, G. F. (2018). *Estabilización de suelos arcillosos con conchas de abanico y cenizas de carbón con fines de pavimentación.* Universidad Nacional del Santa.

Estrada Espinoza, D. J., & Ventura Ruiz, P. J. (2019). *Estabilización de la subrasante del suelo del Centro Poblado San Ignacio con ceniza de concha de abanico, con fines de pavimentación, distrito de Guadalupito – La Libertad, 2019.* Universidad César Vallejo.

Etim, R. K., Ekpo, D. U., Udofia, G. E., & Attah, I. C. (2022). Evaluation of lateritic soil stabilized with lime and periwinkle shell ash (PSA) admixture bound for sustainable road materials. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00665-z>

Garófalo Zambrano, S. A., & Hernández Mejía, J. D. (2018). *Estudio de las características de la cáscara de coco (cocos nucifera) para la obtención y producción de tableros aglomerados y carbón activado.* Universidad Técnica de Quevedo.

Hernández García, A. F., & Herrera Vargas, M. F. (2019). *Análisis de la relación de soporte y resistencia a la compresión de un suelo arcillo-limoso en la vereda de Liberia del municipio de Viotá Cundinamarca estabilizado con ceniza de cascarilla de café* [Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1520&context=ing_civil

- Hernández Toledo, U. I. (2010). *Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento*. Instituto Politécnico Nacional.
- Hinostroza Arones, M. (2020). *Mejoramiento de la subrasante utilizando ceniza de fibra de coco en la Avenida 13 de Julio de Manchay, Pachacamac, Lima - 2019* [Universidad César Vallejo].
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hoyle Vega, P. M., & Rodríguez López, C. A. (2019). *Estabilización del suelo de la trocha carrozable con fibras de raquis de Musa Paradisiaca y cenizas de hojas Eucaliptus de los caseríos Canchas a Colcap, Jimbe, Santa, Áncash – 2019*. Universidad César Vallejo.
- Ikeagwuani, C. C. (2019). Comparative Assessment of the Stabilization of Lime-Stabilized Lateritic Soil as Subbase Material Using Coconut Shell Ash and Coconut Husk Ash. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 3065–3076.
<https://doi.org/10.1007/s10706-019-00825-0>
- INVEMAR (eds.). (2010). Biodiversidad del Margen Continental del Caribe Colombiano. In *Serie de Publicaciones Especiales, Invemar N°20*.
- Kamaruddin, F. A., Nahazanan, H., Huat, B. K., & Anggraini, V. (2020). Improvement of Marine Clay Soil Using Lime and Alkaline Activation Stabilized with Inclusion of Treated Coir Fibre. *Applied Sciences (Switzerland)*.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Colombia busca ingresar a Comunidad Internacional del Coco y lograr nuevas oportunidades para productores*.

Colombia Potencia de La Vida.

<https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Colombia-busca-ingresar-a-Comunidad-Internacional-del-Coco-y-lograr-nuevas-oportunidades-para-productores.aspx>

Moghimi, F., Noorzad, R., & Shirvani, R. A. (2022). Stabilization of Amol fat clay using seashell ash. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(8). <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02816-7>

Nitish, S. S. S., De, S., Ramya, A. V. S. ., & Sudheer Kumar, G. (2021). Comparative Study on Soil Stabilization using Industrial by Products and Coconut Coir. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2040/1/012014>

Nujid, M. M., Idrus, J., Azam, N. A., Tholibon, D. A., & Jamaluddin, D. (2019). Correlation between california bearing ratio (CBR) with plasticity index of marine stabilizes soil with cockle shell powder. *Journal of Physics: Conference Series*, 1349(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012036>

Ofuyatan, O., Olowofoyeku, A., & Oluwafemi, J. (2021). Effect of snail shell ash on black cotton soil. *Journal of Physics: Conference Series*, 1734(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1734/1/012030>

Ok, Y. S., Oh, S. E., Ahmad, M., Hyun, S., Kim, K. R., Moon, D. H., Lee, S. S., Lim, K. J., Jeon, W. T., & Yang, J. E. (2010). Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils. *Environmental Earth Sciences*, 61(6), 1301–1308. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0674-4>

Ospina Ovalle, G. (2016). El papel de las vías secundarias y los caminos vecinales en el

desarrollo de Colombia. *Revista de Ingeniería*, 44, 20–27.
<https://doi.org/10.16924/riua.v0i44.911>

Patel, A., & Mishra, C. B. (2018). *Performance of Seashell Powder on Sub-grade Soil Stabilization*. 1, 150–142. <https://doi.org/10.29007/pzc6>

Ramírez Malla, J. C. (2020). *Estabilización de suelos blandos con adición de valvas de conchas de abanico en la subrasante de la Av. Carapongo – Lurigancho – Chosica 2020* [Universidad César Vallejo].
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ramos Isidoro, Y. E., & Trauco Barrera, F. C. (2020). *Estabilización de la subrasante empleando ceniza de concha de abanico para pavimentación en el AA.HH. Dunas del Sur, Nuevo Chimbote – 2021* [Universidad César Vallejo].
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rivera, J. F., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 84(2), 43–67.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2530>

Sahara, O., Apriyanti, Y., & Fahriani, F. (2020). Analysis of shear strength clay using coconut shell charcoal powder as stabilization material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 599(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/599/1/012068>

Sánchez Pérez, C. J., & Terrones Garcia, R. A. (2020). *Estabilización de suelos utilizando híbrido de polvo de abanico y vidrio reciclado, Huacacorral.*

http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial, B. (2014). *Plan De Ordenamiento Territorial. Municipio De Buenaventura. Resumen Ejecutivo.* 66.

Subia Carrillo, J. J. (2020). *Análisis de la resistencia de la subrasante usando cenizas de coco para mejorar sus propiedades Mecánicas en S.M.P. 2020* [Universidad César Vallejo].

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/50737/Cusma_GM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sudjianto, A. T., Suraji, A., & Susilo, S. H. (2021). Analysis of Soil Characteristics on Expansive Clay Stabilization Using Shell Ash. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6(114)), 58–64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245533>

Vargas, Y. E., Gutierrez, Y. M., & Rojas Marulanda, J. R. (2020). *Estabilización de afirmado con ceniza proveniente de desechos de cascarilla de café para aplicar en suelos de construcción de vías* [Universidad Cooperativa de Colombia].

<https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/5822%0Ahttps://www.redalyc.org/jatsRepo/3832/383257036005/383257036005.pdf>