

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Efecto de la adición de ceniza de fibra de coco en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante de suelos arcillosos, Av. Miraflores - Abancay,

2025

Asesor:

Ph.D. Vásquez Ramírez Abbon Alex

Autor:

Solis Hilares Yesvier

Para optar el Título Profesional:

Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2026

Acta de sustentación



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 019

En la ciudad de Abancay, a los cinco (05) días del mes de junio del 2026, siendo las 09:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0387-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mag. ROLDÁN JUÁREZ, Américo
Dictaminante :	Dra. VERA TEVES, Rosa Marina
Replicante :	Mag. MALDONADO MENDÍVIL, Angel

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: *Efecto de la adición de ceniza de fibra de coco en las propiedades físico - mecánicas de la subrasante de suelos arcillosos, Av. Miraflores- Abancay, 2025*

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: SOLIS HILARES, Yesvier

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐:

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller	Nota	Detalle (**)
Br. SOLIS HILARES, Yesvier	12	APROBADO

Siendo las 10:51 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. ROLDÁN JUÁREZ, Américo

(.....)

Dictaminante: Dra. VERA TEVES, Rosa Marina

(.....)

Replicante: Mag. MALDONADO MENDÍVIL, Angel

(.....)

Nota: Desaprobado: 0-10; Aprobado: 11-20

(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud

Yesvier Solis Hilares

TESIS CON DEPOSITO

 Efecto de la adición de ceniza de fibra de coco en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante de suelos arcillosos, Av. Miraflores - ...

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:602172563

Fecha de entrega

23 jun 2026, 10:49 GMT-5

Fecha de descarga

23 jun 2026, 10:53 GMT-5

Nombre del archivo

TESIS CON DEPOSITO.pdf

Tamaño del archivo

59.7 MB

229 páginas

22.655 palabras

124.879 caracteres



Página 2 de 241 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:602172563

24% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 19%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 21%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitan distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Solis Hílares Yesvier
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	76077440
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0004-9690-6313
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Vásquez Ramírez Abbon Alex
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	06532658
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que se realizó- la investigación	:	2025
Fuente de financiamiento	:	Fondos propios
Porcentaje de similitud	:	24%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A Dios, quien me ha bendecido de innumerables maneras y me ha otorgado la fortaleza y sabiduría para cumplir con todos mis sueños y objetivos.

Dedícaselo a madre quien a pesar de todos aquellos problemas y dificultades nunca dejo de apoyarme, dedicárselo a mi abuela y madre a la vez quien fue la ingeniera en mi vida que fundo los cimientos de los valores y aptitudes que conservo y por último a mi familia en general quienes con sapiencia y respaldo emocional hicieron que llegara hasta este hito fundamental en mi vida.

Agradecimientos

Dirijo este agradecimiento a alma mater la prestigiosa Universidad Tecnológica de los Andes, institución que me reforzó las bases él y conocimientos fundamentales en mi formación académica. A través de sus aulas, adquirí habilidades valiosas que me han permitido avanzar en mi carrera. Esto no hubiera sido posible sin la dedicación y el compromiso de cada uno de los docentes que me acompañaron a lo largo de mi trayecto en la carrera de Ingeniería Civil.

Quiero expresar un reconocimiento especial al ingeniero Abbon Alex Vásquez Ramírez, Ph.D., quien fue mi asesor en este proceso. Su guía, paciencia y constante apoyo fueron claves para que pudiera llevar a cabo esta tesis de la mejor manera posible. Le agradezco profundamente por su esfuerzo y dedicación.

Resumen

El objetivo principal de esta tesis es analizar el efecto de la adición de ceniza de fibra de coco en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025. La investigación se basó en el enfoque cuantitativo, de diseño experimental, es del tipo aplicada y con un nivel explicativo. Las muestras fueron obtenidas de tres puntos distintos de la vía, identificando la calicata C-01 con mayor presencia de material arcilloso, para llevar a cabo los ensayos más detallados debido a que esta muestra presenta las condiciones más desfavorables en de soportar cargas, clasificado como “Arcilla arenosa de baja plasticidad con grava” según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Se realizó ensayos concatenando el suelo arcilloso con ceniza de fibra de coco en diferentes porcentajes: 2%, 4%, 6%, 8% y 10% en relación a su peso seco de la muestra. Los resultados mostraron que el California Bearing Ratio (CBR) aumentó significativamente, destacando el 6% de ceniza como el más efectivo, ya que elevó la resistencia del suelo de 3.9% a 12.55%, el índice de plasticidad descendió de un valor inicial de 11.21% a 8.63%, mientras que la máxima densidad seca sube de 1.892 g/cm³ a 1.956 g/cm³. Por otro lado, se detectó que al incrementarse la ceniza de fibra de coco en un 10% su valor de soporte reduce de 12.55% (valor óptimo al 6%) a un 9.23% reflejando que el exceso de ceniza al reduce la eficiencia de su capacidad de soporte. En conclusión, la ceniza de fibra de coco mejora notablemente el soporte de la subrasante, mejorando la categoría de insuficiente a buena conforme a lo estipulado por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC).

Palabras clave: Ceniza de fibra de coco, CBR, Subrasante.

Abstract

The main objective of this thesis is to analyze the effect of adding coconut fiber ash on the physical-mechanical properties of the clayey soil subgrade on Miraflores Ave., Abancay, 2025. This study employs a quantitative approach and an experimental design, being of an applied type with an explanatory level. Samples were obtained from three different points along the road, identifying test pit C-01 as having the highest presence of clayey material. Detailed testing was conducted on this sample as it presented the most unfavorable load-bearing conditions, classified as 'Sandy lean clay with gravel' according to the Unified Soil Classification System (USCS).

Tests were performed by blending the clayey soil with coconut fiber ash in different percentages: 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% relative to the sample's dry weight. The results showed a significant increase in the California Bearing Ratio (CBR), highlighting 6% ash as the most effective dosage, as it raised the soil resistance from 3.9% to 12.55%. The plasticity index decreased from an initial value of 11.21% to 8.63%, while the maximum dry density rose from 1.892 g/cm³ to 1.956 g/cm³. Conversely, it was found that increasing the coconut fiber ash to 10% reduced the bearing value from 12.55% (the optimal value at 6%) to 9.23%, reflecting that excess ash reduces the efficiency of its bearing capacity. In conclusion, coconut fiber ash remarkably enhances subgrade support, improving its category from insufficient to good according to the Ministry of Transport and Communications (MTC).

Key words: Coconut fiber ash, CBR, Subgrade.

Índice

Portada	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos.....	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos.....	vi
Resumen	vii
Abstract.....	viii
Índice	ix
Índice de tablas.....	xi
Índice de Figuras	xii
Índice de Anexos	xiii
I. Introducción	14
II. Planteamiento del problema	15
2.1. Descripción y formulación del problema.....	15
2.2. Objetivos.....	17
2.2.1. Objetivo General.....	17
2.2.2. Objetivos Específicos.....	17
2.3. Justificación e importancia	18
2.4. Hipótesis	18
2.5. Variables	19
III. Marco Teórico	21

3.1. Antecedentes	21
3.2. Bases teóricas	26
3.3. Definición de términos.....	48
IV. Metodología.....	50
4.1. Tipo y nivel de investigación.....	50
4.2. Ámbito temporal y espacial	51
4.3. Población y muestra.....	52
4.4. Instrumentos	54
4.5. Procedimientos	55
4.6. Análisis de datos	56
4.7. Consideraciones éticas	58
V. Resultados y discusión	59
VI. Conclusiones	85
VII. Recomendaciones	88
VIII. Referencias	89
Anexos.....	97

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variable.....	20
Tabla 2 Composición química de la ceniza de fibra de coco.....	27
Tabla 3 Categorización de materiales subrasantes según su CBR.....	29
Tabla 4 Tamaño de partículas en la clasificación de suelos	31
Tabla 5 Tamaño de tamices y aberturas de malla cuadrada.....	32
Tabla 6 Lectura de carga (CBR).....	43
Tabla 7 Selección de método Proctor modificado.....	45
Tabla 8 Cantidad total de muestra de suelo y ceniza para los ensayos de laboratorio	53
Tabla 9 Instrumentos utilizados para cada ensayo	55
Tabla 10 Asignación de códigos para las muestras.....	61
Tabla 11 Distribución granulométrica de las calicatas	62
Tabla 12 Resumen de los resultados de ensayos para la caracterización de suelos	65
Tabla 13 Proporciones de ceniza de fibra de coco para material arcilloso.....	67
Tabla 14 Índice de plasticidad en suelos con ceniza de fibra de coco	67
Tabla 15 Resultados del ensayo de Proctor para suelos con diferentes proporciones de ceniza de fibra de coco.	69
Tabla 16 CBR al 95% de la MDS con las adiciones de ceniza de fibra de coco al suelo arcilloso	71
Tabla 17 Resultados de diversos ensayos realizados en el suelo arcilloso	74
Tabla 18 Resultados estadísticos de la hipótesis específica 1.....	78
Tabla 19 Resultados del análisis estadístico de la hipótesis específica 2.....	80
Tabla 20 Resultados del análisis estadístico de la hipótesis específica 3.....	83

Índice de Figuras

Figura 1	Representación semilogarítmica de la curva granulométrica.....	35
Figura 2	Aparato para la determinación del límite líquido.....	36
Figura 3	Representación semilogarítmica del límite líquido para 25 golpes	38
Figura 4	Diagrama de los estados de consistencia en suelos	40
Figura 5	Esquema del cilindro para pruebas de CBR.....	41
Figura 6	Gráfico de esfuerzo vs penetración para 12, 26 y 55 golpes	44
Figura 7	Densidad seca vs CBR	44
Figura 8	Representación gráfica de la compactación	48
Figura 9	Mapa de ubicación de calicatas en la Av. Miraflores	60
Figura 10	Curva granulométrica C-01	63
Figura 11	Curva granulométrica C-02	63
Figura 12	Curva granulométrica C-03	64
Figura 13	Índice de plasticidad del suelo con adiciones de ceniza de fibra de coco.....	68
Figura 14	Máxima densidad seca del suelo con ceniza de fibra de coco.....	70
Figura 15	Resultado CBR con ceniza de fibra de coco en suelos arcillosos.....	72
Figura 16	Evolución del CBR con diferentes niveles de ceniza de fibra de coco	73
Figura 17	Valores de la prueba de hipótesis específica 1	79
Figura 18	Gráfico de los valores estadísticos de la hipótesis específica 2.....	82
Figura 19	Representación gráfica de los resultados estadísticos de la tercera hipótesis.....	84

Índice de Anexos

Anexo 1: Matriz de consistencia	98
Anexo 2: Operacionalización de variables	99
Anexo 3: Evidencias	100
Anexo 4: Instrumento de validación	116
Anexo 5: Resultados de laboratorio de suelos	130
Anexo 6: Certificado de uso de laboratorio de suelos	191
Anexo 7: Certificados de calibración	192

I. Introducción

La estabilización del suelo es un paso fundamental en el desarrollo de obras de ingeniería civil, especialmente en proyectos viales, debido a que los suelos en su estado natural por lo general no poseen las condiciones físicas y mecánicas obligatorias para resistir de manera adecuada las cargas inducidas por el tránsito vehicular. En este contexto, resulta necesario intervenir el material del terreno mediante técnicas de mejora que permitan incrementar su capacidad portante y su comportamiento estructural, afianzando consecuentemente un comportamiento y desempeño confiable de la infraestructura vial.

En la presente tesis se incorporó ceniza de fibra de coco en cantidades de 2%, 4%, 6%, 8% y 10% a un suelo arcilloso proveniente de la calicata 01 (C-01), ubicada en la avenida Miraflores, clasificado como arcilla arenosa de baja plasticidad con grava (CL) según el SUCS, en aras de determinar el efecto de este aditivo en las propiedades físico-mecánicas del suelo. Para ello, se llevaron a cabo ensayos en laboratorio en conformidad a la normativa peruana vigente para carreteras y pavimentos, evaluando el índice de plasticidad, la máxima densidad seca y el valor de soporte California Bearing Ratio (CBR).

Esta tesis está estructurada en nueve capítulos: el primero, Introducción, que ofrece un panorama general del estudio; el segundo, Planteamiento del problema, donde se ahonda el problema describiéndola y formulándola, la justificación, las hipótesis y las variables; el tercero, Marco Teórico, recopila antecedentes, fundamentos teóricos y define los conceptos clave; el cuarto, donde se pormenoriza el tipo y nivel de investigación, así como la delimitación temporal y espacial, la población y muestra, procedimientos y análisis de datos y la ética; el quinto, Resultados y discusión, expone y analiza los hallazgos, interpretándolos y contrastando las hipótesis; el sexto, Conclusiones, resume los principales aportes; el séptimo, Recomendaciones, propone acciones basadas en los resultados; el octavo, Referencias, reúne las fuentes bibliográficas consultadas; y el noveno.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

2.1.1. Descripción de la realidad problemática

En el estado de Veracruz, México, se han identificado problemas recurrentes de inestabilidad asociados con la predominancia de suelos arcillosos expansivos, donde este tipo de materiales condiciona el comportamiento de la infraestructura vial. En este contexto, la vía de Juchique se encuentra en mal estado debido a las propiedades de estos suelos, provocando un incremento en el tiempo de viaje y vulnerando la operatividad segura. Estos suelos presentan una respuesta desfavorable frente a las cargas del tránsito debido a su limitada capacidad portante y a los cambios volumétricos que experimentan, los cuales se intensifican en presencia de humedad, generando deformaciones y un deterioro prematuro de las vías. Como consecuencia, se requieren reparaciones constantes, lo que incrementa los costos de mantenimiento y prolonga los problemas en la infraestructura. Este tipo de situaciones resalta la necesidad de buscar soluciones efectivas para estabilizar estos suelos y mejorar la calidad de las vías, considerando el balance entre el costo y la efectividad de las soluciones propuestas (López et al., 2023).

Chirinos (2021), en su estudio sobre los suelos arcillosos en Cundinamarca-Colombia, aborda la problemática que este tipo de suelos generan en la infraestructura vial. En dicha región, los suelos arcillosos presentan una escasa capacidad portante y una alta plasticidad, ocasionando deformaciones en las vías pavimentadas y en otras estructuras construidas sobre este tipo de suelo.

Rojas et al. (2024), en la región de San Martín, Perú, se centraron en los problemas geotécnicos derivados de los suelos arcillosos blandos que predominan en áreas como Rioja y Moyobamba. Estos suelos están caracterizados por su elevada plasticidad y compresibilidad, el cual resulta en variaciones volumétricas significativas cuando se les aplica carga. La investigación destacó que dichos suelos presentan limitaciones en su resistencia mecánica, impidiendo que soporten cargas pesadas sin sufrir deformaciones.

Salazar (2018) señala que, en la ciudad de Abancay, uno de los principales problemas identificados corresponde a los asentamientos y procesos de reptación del suelo, destacando al sector Fonavi como una zona de alto riesgo debido a mayor incidencia de suelos arcillosos. Así mismo resalta que esta clase de suelos no se dispersa uniformemente, sino que se focaliza en sectores específicos; sin embargo, su presencia se incrementa en áreas periféricas como la vía de evitamiento, Leompampa, Puca Puca, Umaccata, San Antonio y, de manera particular, en el sector Fonavi.

En la Avenida Miraflores, ubicada en la ciudad de Abancay en la región de Apurímac, se evidencia una problemática relacionada a la infraestructura vial y a las deficiencias geotécnicas del suelo arcilloso en el sector, el cual tiene una baja capacidad de soporte ante las cargas y una vulnerabilidad de cambios de volumen ante la variación de humedad, como expansión y contracción, generando inestabilidad e incidiendo negativamente la vida útil. Como resultado, la vía muestra deterioros visibles como baches, deformaciones y ahuellamientos, afectando directamente la calidad del tránsito y generando riesgos para conductores y peatones. Asimismo, estas condiciones obligan a realizar intervenciones de mantenimiento de manera frecuente, incrementando los costos y reduciendo la vida útil de la vía.

Una vez identificada el problema, se aprecia la necesidad de evaluar estabilizantes que permitan optimizar las condiciones de la subrasante en la Av. Miraflores. En este sentido, resulta importante analizar el comportamiento del suelo en función de parámetros como el índice de plasticidad, la máxima densidad seca y el CBR, los cuales permiten determinar su capacidad de soporte y desempeño estructural en la infraestructura vial.

2.1.2. Formulación del problema

2.1.2.1 Problema general

¿Cómo influye la adición de ceniza de fibra de coco en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025?

2.1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿Cuál es la influencia de la ceniza de fibra de coco en el índice de plasticidad de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025?
- b) ¿Cuál es la influencia de la ceniza de fibra de coco en la máxima densidad seca de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025?
- c) ¿Cómo influye la ceniza de fibra de coco en la relación de soporte de California (CBR) de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Analizar el efecto de la adición de ceniza de fibra de coco en las propiedades físico-mecánicas (índice de plasticidad, máxima densidad seca y relación de soporte de California) de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

2.2.2. Objetivos Específicos

- a) Determinar el efecto de la adición de ceniza de fibra de coco en el índice de plasticidad de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.
- b) Determinar el efecto de la adición de ceniza de fibra de coco en la máxima densidad seca de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.
- c) Determinar el efecto de la adición de ceniza de fibra de coco en la relación de soporte de California (CBR) de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

2.3. Justificación e importancia

Esta investigación se sustenta en su aporte social, ya que busca contribuir en la calidad de vida de los vecinos de la Av. Miraflores a partir de la optimización del suelo arcilloso mediante la incorporación de un aditivo no convencional, permitiendo mejorar el estado de la vía satisfaciendo estándares exigidos por las normas vigentes para la integración como material de subrasante favoreciendo un tránsito más seguro y eficiente.

Esta investigación se sustenta en su aporte teórico, ya que amplía el conocimiento sobre el efecto que tiene el aditivo de ceniza de fibra de coco al adicionarse al suelo arcilloso y obtener resultados que permiten comprender con mayor claridad el comportamiento del suelo tratado. Este aporte es especialmente significativo en el contexto local y regional, donde aún son poco convencionales el uso de alternativas para estabilizar un suelo.

En el ámbito profesional, esta investigación representa un aporte a la ingeniería civil, al proponer una alternativa técnica para la mejora de suelos arcillosos, se fomenta la adopción de nuevas prácticas en el ámbito de la geotecnia, enfocadas en perfeccionar el diseño y la construcción de infraestructuras viales.

La relevancia de esta tesis se centra en su aporte para enfrentar los problemas condicionantes asociados a las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso, las cuales presentan baja resistencia y alta deformabilidad que compromete la vida útil y estabilidad de las vías. En conjunto, la investigación impulsa soluciones sostenibles que benefician tanto al desarrollo de la ingeniería vial como a la calidad de vida.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La adición de ceniza de fibra de coco influye significativamente en las propiedades físico-mecánicas (índice de plasticidad, máxima densidad seca y relación de soporte de California) de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

2.4.2. Hipótesis específicas

- a) La adición de ceniza de fibra de coco influye en el índice de plasticidad de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.
- b) La adición de ceniza de fibra de coco influye en la máxima densidad seca de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.
- c) La adición de ceniza de fibra de coco influye en la relación de soporte de California (CBR) de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

2.5. Variables

Variable independiente: ceniza de fibra de coco

La ceniza que resulta de la quema de la fibra de coco es un subproducto valioso obtenido a través del reciclaje local de las cáscaras. Este proceso implica secar la fibra y la cáscara, y luego calentarlas en un horno, lo que transforma las cáscaras en cenizas. Estas cenizas están compuestas principalmente por sílice, junto con óxidos metálicos como potasio, calcio y magnesio, y minerales traza como hierro, zinc y fósforo. La alta concentración de sílice y potasio hace que la ceniza de fibra de cáscara de coco sea adecuada para diversas aplicaciones, especialmente en la mejora de materiales de construcción. Gracias a su contenido mineral, ha sido objeto de investigación en diversas industrias, destacándose como un recurso prometedor y versátil con el potencial de contribuir a la sostenibilidad y la innovación en el aprovechamiento de recursos reciclados (Arimanwa et al., 2020).

Variable dependiente: propiedades físico-mecánicas de la subrasante

El desempeño del pavimento está intrínsecamente condicionado por sus propiedades físicas como la densidad y la granulometría las cuales son determinantes para su compactación, mientras que propiedades como la capacidad de soporte y la resistencia al corte determinan su respuesta ante cargas. (Cauna & Corasi, 2023).

Tabla 1

Operacionalización de variable

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Variable independiente: ceniza de fibra de coco	Es el residuo que queda después de quemar la fibra de la cáscara del coco, un material que se obtiene mediante el proceso de reciclaje de la cáscara de coco local (Arimanwa et al., 2020, p.69).	Se mide como porcentaje en función al peso seco de la muestra del suelo, dosificando la ceniza de fibra de coco, utilizando balanza de precisión para medir la cantidad de ceniza y suelo seco.	-Dosificación	-S + 2 % de ceniza de fibra de coco -S + 4 % de ceniza de fibra de coco -S + 6 % de ceniza de fibra de coco -S + 8 % de ceniza de fibra de coco -S + 10 % de ceniza de fibra de coco	Fichas de laboratorio -Manual de ensayo de materiales (MTC, 2016).
Variable dependiente: Propiedades físico-mecánicas de la subrasante	El desempeño del pavimento está directamente condicionado por las propiedades físico-mecánicas de la subrasante, las cuales influyen en su estabilidad y capacidad de soporte. Propiedades físicas como la humedad, densidad y granulometría son determinantes para la compactación, mientras que propiedades mecánicas como el CBR y la resistencia al corte determinan su respuesta ante cargas (Cauna & Corasi, 2023, p. 21). El índice de plasticidad (IP) se refiere al rango en el que un suelo presenta un comportamiento plástico, y esta determinado por su contenido de humedad (NTP 339.129, 2019, p. 4). La densidad máxima seca corresponde al mayor valor que se obtiene en la curva de compactación en la que puede alcanzar un suelo al ser compactado bajo un esfuerzo específico estandar o modificado (MTC, 2018, p. 16). El valor relativo de soporte de un suelo o material se determina evaluando la penetración de una fuerza aplicada sobre una masa de suelo (MTC, 2016, p. 248).	El índice de plasticidad se determina a partir de los ensayos de límites de Atterberg, mientras que la densidad seca máxima se obtiene mediante el ensayo de compactación Proctor modificado. En cuanto al valor relativo de soporte, este se evalúa a través del ensayo CBR, el cual evalúan muestras compactadas bajo diferentes niveles de energía.	-Índice de plasticidad -Máxima densidad seca -Relación de soporte de california (CBR)	Límite líquido - Límite plástico = IP (%) Proctor modificado: (óptimo contenido de humedad (%) y máxima densidad seca: (g/cm³)) Resistencia a la penetración (%)	Fichas de laboratorio MTC E 110, MTC E 111 MTC E 115 MTC E 132

Nota. Elaboración propia.

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. A nivel internacional

Afthab et al. (2024), en su artículo de investigación titulado “Optimización de la ceniza de cáscara de coco para mejorar la resistencia del suelo arcilloso”. El estudio se llevó a cabo en Kerala, India, empleando muestras de suelo arcilloso, conocidos por sus propiedades de baja resistencia y alta capacidad de expansión. Tuvieron como objetivo explorar el potencial de la ceniza de cáscara de coco como material estabilizante en suelos arcillosos, mediante una metodología de tipo experimental con enfoque cuantitativo. Los resultados de la adición de ceniza de cáscara de coco (CSA) en proporciones de 5%, 10%, 15% y 20% mostró una mejora progresiva en la resistencia del suelo, teniéndose del valor de compresión no confinada (UCS) del suelo patrón en 2.04 kN/m², incrementándose progresivamente con la adición de ceniza, siendo 2.3 kN/m², 2.43 kN/m², 3.06 kN/m² y 2.43 kN/m² alcanzando su punto máximo con el 15% de CSA, con un incremento notable de 3.06 kN/m². Además, la densidad máxima seca (MDD) mostró un aumento de 1.24g/cm³ a 1.38 g/cm³ con el 15% de CSA. En conclusión, El contenido óptimo para la estabilización fue el 15% de ceniza de cáscara de coco, lo que optimizó la resistencia del suelo y redujo la hinchazón y contracción, mejorando las propiedades del suelo. Este estudio resalta el uso sostenible de materiales como la ceniza de cáscara de coco para la estabilización de suelos, contribuyendo a la construcción ecológica.

Ikeagwuani y Nwonu (2023), artículo investigativo titulado “Análisis de estabilidad y predicción de suelos expansivos modificados con el residuo de la calcinación de cascara de coco (CSA) como material de terraplén de carreteras”, realizado en Nigeria, tuvieron un objetivo, analizar la estabilidad de taludes en suelos modificados con el aditivo de ceniza antes mencionado, combinando ensayos de laboratorio, modelación numérica y análisis predictivo. Teniendo una ejecución bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño experimental y metodología explicativa. Para ello, se incorporó CSA en proporciones de

0%, 4%, 8%, 12%, 16% y 20% respecto al peso seco del suelo. La muestra inicial tuvo valores de compresión no confinada (UCS) de 164 kPa, CBR de 3.5% y cohesión de 65 kPa. Con la adición del 16% de CSA, se evidenció una mejora notable, alcanzando valores de UCS de 374 kPa, CBR de 8.3% y cohesión de 214 kPa. En conclusión, la incorporación del aditivo CSA mejora el comportamiento de suelos expansivos, posicionándose como una alternativa técnica eficiente y sostenible para su aplicación en terraplenes viales.

Kumar y Sharma (2022), en su investigación titulada “Estabilización química de suelos arcillosos utilizando una mezcla de residuos de carburo de calcio y ceniza de cáscara de coco”. desarrollada en la India, tuvieron como objetivo evaluar el efecto de la incorporación de residuos de carburo de calcio (CCR) y ceniza de cáscara de coco (CSA) en las propiedades de suelos arcillosos. Para ello, se empleó una metodología experimental de nivel explicativo, considerando una proporción fija de 20% de CSA y variaciones de CCR en 0.5%, 1.0% y 1.5%. Los resultados mostraron una mejora progresiva en el comportamiento mecánico del suelo, destacando el incremento en la resistencia a la compresión no confinada (UCS), que pasó de 240.05 kN/m² en el suelo natural a 381.73 kN/m² con la mayor dosificación de CCR. Asimismo, la densidad seca máxima presentó un comportamiento favorable, alcanzando su valor óptimo con una dosificación intermedia. De igual manera, el CBR se incrementó de 2.2% hasta 4.6% con la combinación más eficiente. En consecuencia, se concluye que la incorporación conjunta de ceniza de cáscara de coco y residuos de carburo de calcio mejora significativamente la resistencia y capacidad de soporte del suelo, constituyendo una alternativa viable para su estabilización.

Yusuf y Zava (2019), en su artículo titulado "Investigación sobre la idoneidad de la ceniza de cáscara de coco como estabilizador de suelos para carreteras". Estudio cuyo objetivo es escrutar la viabilidad de la ceniza de cáscara de coco (CHA) como estabilizante de suelos en la construcción de carreteras, mediante una metodología experimental con enfoque cuantitativo. Para ello, se concateno el suelo laterítico con distintas fracciones de

CHA, que variaron entre 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 16% y 20% respecto al peso seco. Los resultados evidenciaron un incremento significativo en el CBR a medida que se añadía ceniza, alcanzando su valor máximo del 20% con una dosificación del 8%, mientras que concentraciones mayores mostraron una disminución en el rendimiento. Asimismo, se comprobó que la ceniza posee características puzolánicas, con una composición química adecuada para su uso como estabilizante, estableciéndose el 8% como la proporción óptima para su aplicación en infraestructura vial.

Jagwani y Jaiswal (2019), en su artículo de título “Estabilización de suelos expansivos con ceniza de cáscara de coco”. El estudio, realizado en Indore, India, en las cuales se analizó el comportamiento del suelo expansivo con alto contenido de arcilla tras añadirle el residuo de la calcinación de la cascara de coco (CHA). Bajo este enfoque, se empleó una metodología cuantitativa y diseño experimental con incorporación escalonada de 5%, 10%, 15% y 20%. El hallazgo obtenido reveló una mejora sustancial en su comportamiento, resultando en el declive de su índice de plasticidad de 31% a 9% al 10% de la adición de dicho aditivo y el aumento en su máxima densidad de su estado seco de 15.2KN/m^3 a 16.7KN/m^3 , por otro lado, al adicionarse un 20% del aditivo la compresión no confinada incrementa de 164KN/m^2 a 316KN/m^2 . Concluyendo así que la proporción para mejorar los atributos físicos y mecánicos de un suelo expansivo con alto contenido de arcilla es a una adición de 20% del aditivo, representando una alternativa más económica y sostenible para realizar la estabilización.

3.1.2. A nivel nacional

Núñez (2024), en su tesis titulada "Estudio experimental del uso de la ceniza de cascarilla de Oryza Sativa y fibra de coco en la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante". Planteó como objetivo general evaluar cómo influye la adición de la ceniza de cascarilla de Oryza de Sativa y fibra de coco en la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante. Para ello, se empleó una metodología de enfoque cuantitativo con diseño experimental, considerando diferentes combinaciones de ceniza de cascarilla de

arroz (CCA) y fibra de coco (FDC) en proporciones de 4.5% + 2%, 8.5% + 4%, 12.5% + 5% y 16.5% + 8%, respectivamente. Los resultados evidenciaron un incremento significativo en la capacidad de soporte del suelo, reflejado en el aumento del CBR en la calicata C2, que pasó de 3.2% en el suelo natural a 21.2% con la mayor dosificación de los aditivos. En consecuencia, se concluye que la incorporación de ceniza de cascarilla de arroz y fibra de coco mejora de manera significativa el comportamiento del suelo arcilloso, constituyéndose como una alternativa viable para su estabilización en subrasantes.

Guzmán y Rodríguez (2021), en su tesis para optar el título de ingenieros civiles, “Mejoramiento de la subrasante empleando ceniza de cáscara de coco en el distrito de Perené, Junín 2021”, establecieron como objetivo la evaluación de este material como una alternativa para la estabilización del suelo. En este sentido, se desarrolló bajo enfoque cuantitativo y diseño experimental, trabajando con variadas proporciones de dicho aditivo. Se evidenciaron hallazgos de mejora que se ven reflejadas en el incremento de relación de soporte (CBR) de un 4.9% obtenido de la muestra inicial a un 7.9% en dosificación del 0.6% del aditivo. De igual forma, incrementó escalonadamente su máxima densidad seca, correlacionado a la adición progresiva de la ceniza; contrario a estos, su índice de plasticidad tuvo una decaída, pasando de 18.2% a 14.5% con el mayor porcentaje de aditivo. Concluyéndose que, al incorporar y combinar la ceniza con la muestra de suelo, se da paso a la mejora de sus atributos físicos y mecánicos, siendo óptimo para su aplicación como material de subrasante.

Hinostroza (2020), en su tesis titulado “Mejoramiento de la subrasante utilizando ceniza de fibra de coco en la Avenida 13 de Julio de Manchay, Pachacamac, Lima - 2019”. Se centro en el propósito de evaluar la influencia de la ceniza de fibra de coco y de caña de azúcar en la mejora de la subrasante. Bajo este enfoque, la investigación fue de tipo aplicada con diseño no experimental, considerando dosificaciones de 0.5%, 1.5%, 3%, 5% y 8%. A partir de ello, los resultados evidenciaron un incremento en la capacidad de soporte del suelo en función a la adición progresiva del aditivo, reflejado en el aumento del CBR de 4.2% en condición natural hasta 11.78% en la mayor proporción. De igual manera, la

densidad seca mostró una mejora, variando de 1.56 g/cm³ a valores entre 1.78 g/cm³ y 1.95 g/cm³ según la dosificación. En síntesis, la incorporación de ceniza de fibra de coco optimiza las propiedades físico-mecánicas del suelo, alcanzando su mejor desempeño con el 8%, lo que respalda su uso como material adecuado para subrasante.

Monteza (2021), en su artículo de investigación con el título “Estabilización de la subrasante con el uso de cenizas de cáscara de coco en la Calle Juan Velasco, Carabayllo, 2021”. Teniendo como finalidad validar el efecto de la ceniza cascara de coco en la estabilización de la subrasante de la Calle Juan Velasco. Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño experimental de nivel explicativo, considerando adiciones de ceniza del 1.5%, 5% y 8%. Los resultados mostraron un aumento significativo en la capacidad de soporte del suelo (CBR) pasando de 9.5% en el suelo sin aditivo a 25.8% en la mayor dosificación. También se observó un incremento en la densidad máxima seca, el cual expresa una mejora en el comportamiento del suelo al incorporar la ceniza. En conclusión, la adición de ceniza de cáscara de coco permite mejorar sus cualidades mecánicas del suelo, siendo el 8% la proporción más eficaz para la estabilización de la subrasante.

Rimachi y Sánchez (2019), en su tesis titulada “Estabilización de suelos con adición de ceniza de cáscara de coco al 0.5%, 1.5%, 3%, 5% y 8%, a nivel de subrasante en el sector de Lampanin Distrito de Cáceres del Perú Provincia del Santa, Ancash – 2019”. Buscaron optimizar las propiedades del suelo y garantizar su firmeza mediante la adición de dicho aditivo. El estudio se determinó aplicando un método explicativo con enfoque cuantitativo y diseño experimental. Los ensayos evidenciaron una mejora continua en la resistencia del suelo, reflejada en el incremento del CBR desde 5.69% en su estado original hasta alcanzar 18.26% al incorporar una dosificación del 5%. En cuanto a su densidad máxima seca también mejoró, aumentando de 1.56 g/cm³ a valores entre 1.78 g/cm³ y 1.95 g/cm³ según la proporción aplicada. En conclusión, la incorporación de ceniza de cáscara de coco optimiza las propiedades mecánicas del suelo, destacando el 5% como la dosificación más eficiente.

3.1.3. A nivel regional y local

Debido a la poca información a nivel local y regional sobre la estabilización de suelos arcillosos con el uso de ceniza de fibra de coco, señala este tema como un área poco explorada, otorgando relevancia a esta tesis. El estudio aborda la problemática de la baja capacidad de carga de los suelos aplicada por el tráfico vehicular, especialmente en la infraestructura vial de la zona. Al ser uno de los primeros trabajos en la región, aporta evidencia técnica y establece bases para futuras investigaciones en suelos locales. Además, vincula la teoría con la práctica, proponiendo una alternativa sostenible que responde a necesidades reales de la población.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Ceniza de fibra de coco

El residuo obtenido por la quema la fibra de la cáscara de coco proviene del reciclaje de cáscaras locales, en las cuales no solo es una opción sostenible, sino también una forma de aprovechar un material en la que normalmente sería desechado. En este proceso, las cáscaras y fibras se secan y se calientan en un horno, lo que genera cenizas ricas en sílice, potasio, calcio y magnesio. Estas cenizas también contienen minerales traza, como hierro, zinc y fósforo, que son esenciales para varias aplicaciones industriales. La alta concentración de sílice y potasio hace que la ceniza sea especialmente adecuada para mejorar materiales de construcción, ya que puede aumentar la durabilidad y resistencia de los materiales. Además, su riqueza mineral la hace útil en sectores como la agricultura, para la producción de fertilizantes naturales. Debido a su composición, esta ceniza ha atraído un notable interés en las investigaciones científicas, posicionándola como un recurso altamente versátil y valioso, con un amplio rango de aplicaciones en diversas industrias, ayudando a promover soluciones más sostenibles (Arimanwa et al., 2020).

3.2.1.1 Propiedades de la fibra de coco

La fibra de coco es un material valioso debido a su firmeza y resistencia, lo que la hace ideal para la fabricación de artículos cotidianos como colchones y cepillos. Su

estructura fuerte y consistente le otorgan una gran durabilidad. La ceniza obtenida de la quema de su fibra, por su parte, es rica en sílice y otros minerales como potasio, calcio y magnesio, que la hacen adecuada para mejorar materiales de construcción. La investigación sobre la ceniza de coco continúa, ya que su alto contenido mineral le otorga una gran versatilidad, especialmente en sectores industriales que buscan optimizar la calidad de sus productos (Buitrago, 2022).

3.2.1.2 Composición química de la ceniza de fibra de coco

La ceniza de fibra de coco contiene diversos compuestos que le confieren propiedades aprovechables en distintas áreas, especialmente aplicada en la construcción, materiales refractarios y procesos industriales. Su caracterización resulta clave para comprender su potencial como material alternativo, permitiendo su valorización como insumo en diversos procesos en lugar de ser considerado un residuo sin utilidad (Kumar & Sharma, 2022).

Tabla 2

Composición química de la ceniza de fibra de coco

N°	Nombre del constituyente	Porcentaje
1	Composición química de la ceniza de cáscara de coco (SiO_2)	37,97%
2	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	39,60%
3	Óxido de calcio (CaO)	4,98%
4	Óxido de magnesio (MgO)	1,89%
5	c	0,71%
6	Na_2O	0,95%
7	P_2O_5	0,32%

Nota. Composición principal de la ceniza de cáscara de coco (Kumar & Sharma, 2022).

3.2.2. *Propiedades físico-mecánicas de la subrasante*

Estos parámetros físico-mecánicos de la subrasante son fundamentales para asegurar la estabilidad y la capacidad de carga del pavimento. Sus características físicas como su distribución granular, el contenido de humedad y la densidad define el cómo se compacta la subrasante y cómo se comporta en general. En cuanto a sus propiedades mecánicas, como la resistencia al corte y la capacidad de soporte (CBR) son cruciales en la respuesta de la subrasante ante las cargas aplicadas. Estas propiedades pueden llegar a ser mejoradas con procesos de compactación o estabilización utilizando materiales como cal o cemento, dando así una mejora en el desempeño del pavimento (Cauna & Corasi, 2023).

3.2.2.1 Estabilización de la subrasante

La estabilización de la subrasante, según el MTC (2018), busca mejorar la resistencia de los suelos mediante la adición de estabilizantes químicos o naturales, aplicando procedimientos mecánicos. Esto es particularmente útil para suelos de baja calidad. Entre los estabilizadores utilizados están el cloruro de sodio, cemento, cal y emulsiones asfálticas. Para que un suelo sea adecuado para la subrasante, debe tener un CBR de al menos el 6%. Si no cumple con este valor, se requerirán estudios adicionales para determinar si puede ser estabilizado o debe ser reemplazado. Si se encuentran materiales de arcilla o limo en las capas del suelo, se debe planificar la adición de una capa de material o un geotextil para evitar que pequeñas partículas contaminen las capas inferiores del pavimento. Es esencial identificar el tipo de suelo para elegir la mejor forma de estabilización, siendo los más comunes SM y SC.

3.2.2.2 Capacidad de soporte de la subrasante

Esta propiedad mecánica referida a su capacidad de soporte es un factor fundamental para determinar la resistencia ante cargas. Este aspecto resulta importante al momento de diseñar infraestructuras viales, donde el tráfico vehicular y el clima ponen a prueba su comportamiento estructural. Por ello, la subrasante debe ser adecuadamente

preparada mediante trabajos de movimiento de tierras, como el corte, relleno y compactación. Estas acciones no solo mejoran la estabilidad del terreno, sino que también contribuyen a optimizar la resistencia del pavimento frente a factores ambientales, garantizando su durabilidad. (MTC, 2014, p. 25).

El CBR de los materiales de la subrasante debe ser, como mínimo, del 6%, ya que este valor permite asegurar que el suelo la capacidad suficiente para tolerar las cargas generadas por el peso vehicular sin presentar deformaciones importantes. Cuando el CBR es menor, la subrasante no resulta adecuada para soportar las solicitudes de la vía, por lo que es necesario aplicar técnicas de mejoramiento del suelo. Entre estas alternativas se encuentran la estabilización mecánica, que incrementa la densidad y resistencia mediante procesos de compactación; la estabilización química, que emplea aditivos para modificar las propiedades del suelo; el uso de geosintéticos para reforzar su estructura; o la sustitución del material por uno de mejores características. Asimismo, pueden considerarse otras soluciones como mejorar el drenaje o ajustar el diseño de la vía, con la meta de garantizar un adecuado comportamiento y una mayor durabilidad de la infraestructura (MTC, 2014, p. 89).

Tabla 3

Categorización de materiales subrasantes según su CBR

Categoría	CBR ₁
S ₀ : Subrasante inadecuadas	CBR <3%
S ₁ : Subrasante insuficientes	CBR ≥3% a CBR<6%
S ₂ : Subrasante regular	CBR≥6% a CBR<10%
S ₃ : Subrasante buenas	CBR≥10% a CBR <20%
S ₄ : Subrasante muy buena	CBR ≥20% a CBR <30%
S ₅ : Subrasante excelentes	CBR ≥30%

Nota. La tabla clasifica las materiales subrasantes en función de su CBR (MTC, 2014, p. 120).

3.2.2.3 Criterio geotécnicos para estabilizar suelos

Para el mejoramiento de un suelo, es necesario considerar diversos criterios técnicos. Si la subrasante presenta condiciones inadecuadas, como zonas húmedas o blandas, se requiere aplicar métodos de estabilización, ya sea de tipo mecánico, mediante aditivos o con el uso de geosintéticos. Esta intervención es particularmente importante en suelos arcillosos o limosos, debido a su mayor susceptibilidad a la humedad. Asimismo, es fundamental evaluar la idoneidad del suelo de subrasante en función de la capa freática y considerar factores ambientales como la presencia de heladas en altitudes superiores a los 4000 m s.n.m. La identificación adecuada del tipo de suelo permite seleccionar el método de estabilización más conveniente, tomando en cuenta también el uso previsto, la disponibilidad de materiales, la experiencia técnica y los costos asociados (MTC, 2014, p. 89).

Para poder aplicar una estabilización mediante un método adecuado, se es necesario haber identificado mediante un estudio la naturaleza del suelo existente y la tipología del mismo, resultados en las cuales dan indicios de presencia a variaciones volumétricas frente a cambios de humedad, su contenido de finos y capacidad de soportar cargas. Ante resultados que no son favorables, se puede lograr mejora mediante aditivos químicos y técnicas mecánicas como la compactación o geosintéticos, considerando siempre la viabilidad económica y la disponibilidad de materiales. (Caltrans, 2021).

3.2.2.4 Tipos de estabilización de suelos

El objetivo de estabilizar el suelo es buscar una mejora de sus propiedades físico-mecánicas mediante el uso de diversos métodos, incluyendo los mecánicos, y productos de naturaleza química, natural o sintética. Este proceso da paso a la mejora de la capacidad del suelo para soportar estructuras como pavimentos y edificios, previniendo riesgos como la erosión, los asentamientos irregulares y las fisuras que pueden comprometer el desempeño de la infraestructura. Gracias a la estabilización, el suelo se vuelve más

resistente, lo que asegura que las construcciones sean más duraderas y estables (MTC, 2014, p. 89).

Cuando los suelos destinados a usarse como material de subrasante no abastecen los estándares requeridos, se dispone aplicar métodos de estabilización para mejorar sus propiedades y satisfacer los criterios técnicos necesarios. Una opción viable es mediante la compactación, en las cuales ayuda a disminuir los vacíos de forma que no se altere la estructura interna, otra forma es mediante la estabilización combinada, donde se escarifica el suelo a una profundidad de 15cm y concatenarlo con material extraído de una cantera que cumpla las especificaciones técnicas. La sustitución del suelo, se reemplaza el material deficiente por uno de mayor calidad, colocado y compactado por capas hasta lograr las condiciones necesarias. Por último, la estabilización química utiliza aditivos como cal, cemento, polímeros o derivados del petróleo para reducir la plasticidad y controlar la expansión y contracción del suelo. (MTC, 2014).

3.2.3. *Propiedades físicas*

A. Ensayo de granulometría

El análisis de la distribución granular de suelos, realizado mediante tamizado según el Ensayo MTC E 107, permite identificar con precisión la composición de los tamaños de partículas que existen en el material. Recaudar esta información es clave para inferir propiedades importantes del suelo, tales como su resistencia y potencial de permeabilidad. Además, facilita la clasificación de las partículas por tamaño, haciéndolo esencial para comprender cómo se comporta el suelo en distintas condiciones y para su correcta aplicación en proyectos de ingeniería. (MTC, 2016).

Tabla 4

Tamaño de partículas en la clasificación de suelos

Tipo de material	Tamaño de partículas
Grava	75 mm – 4.75 mm
Arena	Arena gruesa: 4.75 mm – 2.00 mm

		Arena media: 2.00 mm – 0.425 mm
		Arena fina: 0.425 mm – 0.075 mm
Material fino	Limo	0.075 mm – 0.005 mm
	Arcilla	Menor a 0.005 mm

Nota. Esta tabla clasifica los suelos de acuerdo con el tamaño de las partículas que los componen (MTC, 2014).

Para realizar la correcta clasificación del suelo, es fundamental analizar la distribución de las partículas contenidas por la misma, lo que permite anticipar su comportamiento ante distintas cargas y condiciones. Se consideran las cantidades de material granular, arenoso y fino. En suelos de fracción gruesa se analiza la gradación, determinando los diversos tamaños que encajan casi a perfección (bien gradada) o donde solo predominan un mismo tamaño (mal gradada). En suelo de composición limosa y arcillosa, se evalúan propiedades como la plasticidad, que influye directamente en su desempeño frente a cambios en el contenido de humedad. (WSDOT, 2013).

Tabla 5

Tamaño de tamices y aberturas de malla cuadrada

Tamiz	Aberturas (mm)
3.00"	75
2.00 "	50.8
1 ½"	38.1
1.00"	25.4
¾"	19.0
⅜"	9.5
Nº 4.00	4.76
Nº 10.00	2.00
Nº 20.00	0.84
Nº 40.00	0.425
Nº 60.00	0.260
Nº 140.00	0.106
Nº 200.00	0.075

Nota. Se muestran los diferentes tamaños de tamices y sus aberturas correspondientes en milímetros. Referencia (MTC, 2016).

-El equipo utilizado es:

Para realizar los ensayos, se emplea un equipo de alta precisión, destacando una balanza digital capaz de detectar variaciones de hasta 0,01 g y 0,1 g, lo que asegura mediciones exactas. Se utiliza un horno para el secado de las muestras y se selecciona la serie de tamices de malla cuadrada según lo indicado en la tabla 02, adaptada al tamaño de cada tipo de partícula. Además, se cuentan con recipientes adecuados para el manejo y pesaje preciso de las muestras, así como cepillos para mantener la limpieza durante el procedimiento, garantizando la fiabilidad de los resultados.

-La muestra:

Para preparar la muestra, se debe homogenizar todo el material, asegurando que los componentes estén distribuidos de forma uniforme. Luego, la muestra se divide en cuatro fracciones para obtener la proporción adecuada que se utilizara. El procedimiento de este ensayo se puede realizar mediante la muestra completa o solo con una parte de ella, dependiendo de la composición fina. Mediante un proceso de lavado se separan las partículas finas, seguido de un secado y luego un tamizado con una serie de coladores de diferentes aberturas para clasificar su composición según tamaño.

Procedimiento:

Para llevar a cabo el tamizado, se utilizan tamices de distintos tamaños, como 3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 3/8" y N° 4, que permiten separar las partículas retenidas en la malla N°4. Este procedimiento puede efectuarse de manera manual o mecánica, según el nivel de precisión requerido. En el procedimiento, cada fracción que fue retenida es pesada con una balanza de alta precisión y se registra el peso obtenido, en especial para la fracción en el tamiz N°4. Para que la prueba sea válida, los pesos de las fracciones deben coincidir con el peso con el cual inicio, en las cuales se permite solo una variación del 1%. La cantidad que pasa por el tamiz N°4 es sometida por un proceso de lavado usando la malla N°200, con un mínimo de 115g para arena y 65g para finos. Tras el lavado y secado, se

realiza un tamizado con tamices de grano fino, asegurando así la correcta clasificación de las partículas según su tamaño.

Cálculos:

- Para calcular el porcentaje de material retenido en cada malla, se utiliza una fórmula que permite clasificar las partículas según su tamaño.

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{peso retenido en el tamiz}}{\text{peso total de la muestra}} \times 100 \quad (1)$$

- Para calcular el contenido fino que pasa a través de la malla N°200, se utiliza la fórmula adecuada:

$$\% \text{ pasante la N}^\circ 200 = \frac{\text{peso total} - \text{peso retenido en la malla N}^\circ 200}{\text{peso total}} \times 100 \quad (2)$$

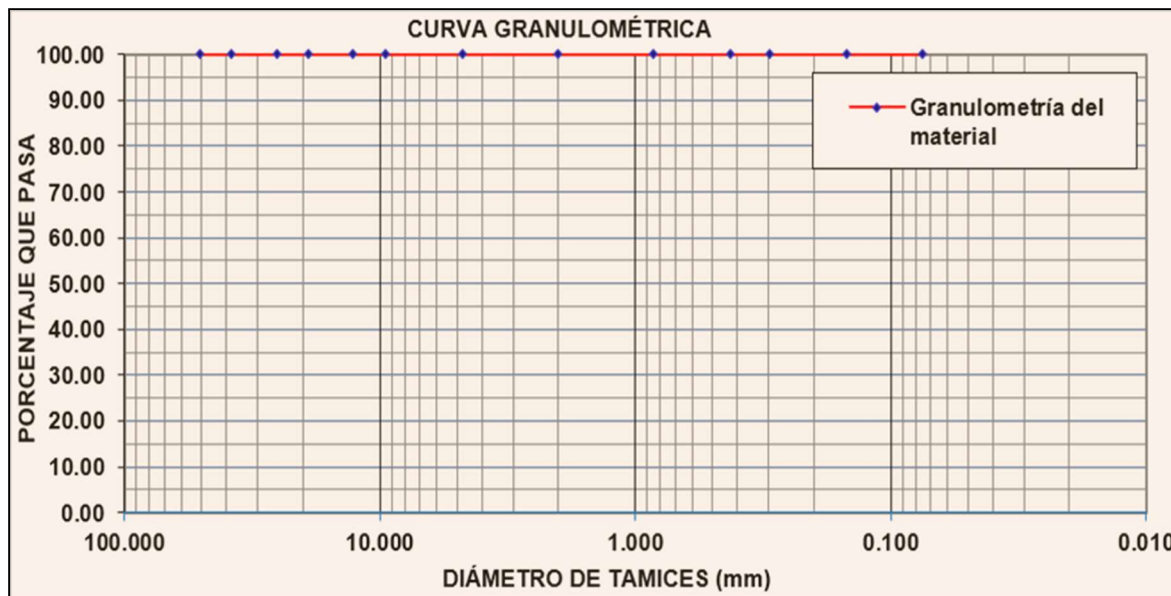
- Se utiliza una fórmula específica para determinar qué proporción del material atraviesa la malla.

$$\% \text{ pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado} \quad (3)$$

- Los resultados determinados mediante el ensayo, se plasman en un gráfico semilogarítmico, en las cuales las aperturas se ubican en la ordenada (eje horizontal) y las partículas que atraviesan se ubican en las abscisas (vertical). La figura N°1 muestra un ejemplo de esta representación gráfica.

Figura 1

Representación semilogarítmica de la curva granulométrica



Nota. La figura ilustra la curva granulométrica del material en un gráfico semilogarítmico. Elaboración propia.

B. Ensayo contenido de humedad

Este ensayo se lleva a cabo aplicando un procedimiento a las muestras de suelo con humedad natural obtenida in situ. Las muestras se secaban, lo que produce un cambio radical en sus propiedades. Los contenidos de humedad de cada tipo de suelo se expresan como un porcentaje, y para determinar el peso del agua que fue evaporado en su totalidad se realiza mediante un secado en un horno a 110 ± 5 °C. (MTC, 2016).

El contenido de humedad es la relación porcentual entre la cantidad de agua presente en un suelo y su masa seca. (MTC, 2016).

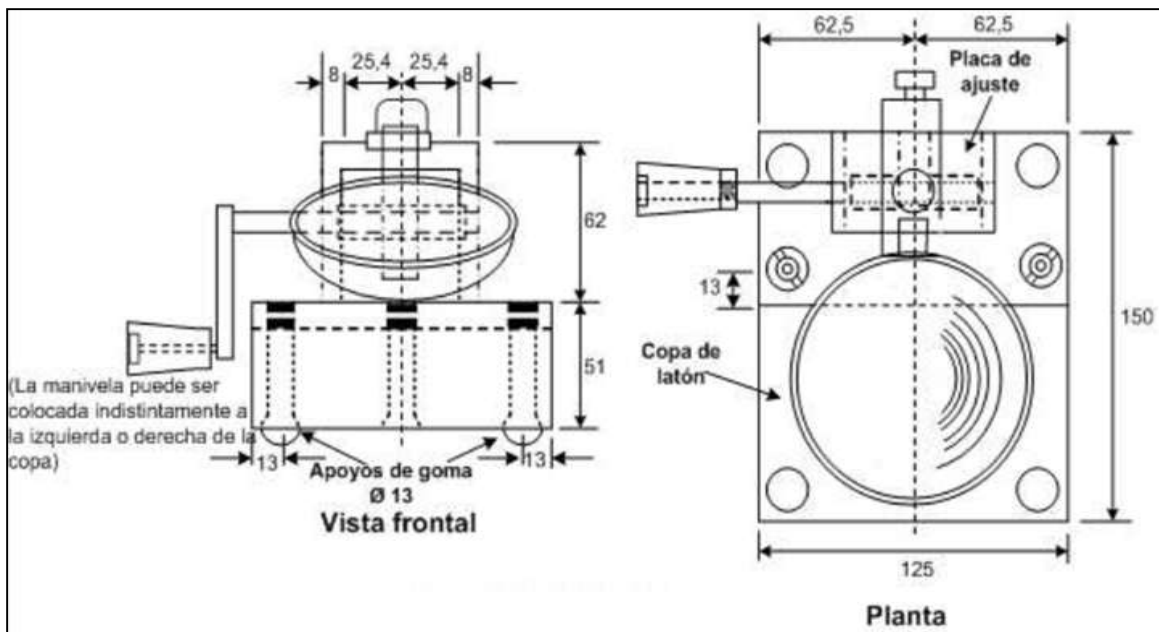
C. Límites de Consistencia:

- Límite Líquido

Este método de ensayo se expresa en porcentaje y se emplea para analizar las fracciones finas de los suelos. Para ello es esencial el uso de la copa de Casagrande, en las cuales permite medir el contenido de humedad del suelo mediante la aplicación 25 golpes. Esta técnica permite determinar cuan plástico es el suelo, esencial para su clasificación y comportamiento ante cambios de humedad (MTC, 2016).

Figura 2

Aparato para la determinación del límite líquido.



Fuente. Este esquema detalla el aparato que se utiliza en el laboratorio para la determinación del límite líquido de los suelos (MTC, 2016).

Según lo estipulado en la normativa MTC E 110, al medir el límite líquido, parámetro que permite determinar el contenido de agua que un suelo puede retener antes de pasar de un estado plástico al estado líquido, las cuales permiten evaluar su capacidad de resistir deformaciones bajo aplicaciones de carga.

Equipos:

Para ejecutar dicho ensayo de manera precisa, se requieren de varios equipos especializados. Los recipientes de porcelana son perfectos para mantener el material en buenas condiciones durante el proceso. La cuchara de Casagrande es crucial para tomar muestras del suelo de manera controlada, mientras que el acanalador ayuda a crear una ranura precisa en la muestra, lo que facilita las mediciones necesarias. Los contenedores metálicos sirven para almacenar el material durante los procedimientos del ensayo. La balanza electrónica, ayuda a detectar variaciones de hasta 0,01 g, garantizando la exactitud de las mediciones del material. Por último, el horno calibrado a 110 ± 5 °C para deshidratar, sirve para asegurar que las muestras ya no tengan contenido de agua.

Muestras:

Para dar inicio al ensayo, se necesita de una porción de la muestra representativa que pesa entre 150 y 200 gramos. Esta porción debe haber pasado a través de la criba N°40, lo que garantiza que solo las partículas adecuadas sean utilizadas en el ensayo. Este paso es esencial para asegurar que las partículas que podrían alterar los resultados del ensayo sean eliminadas, proporcionando una base confiable para el análisis.

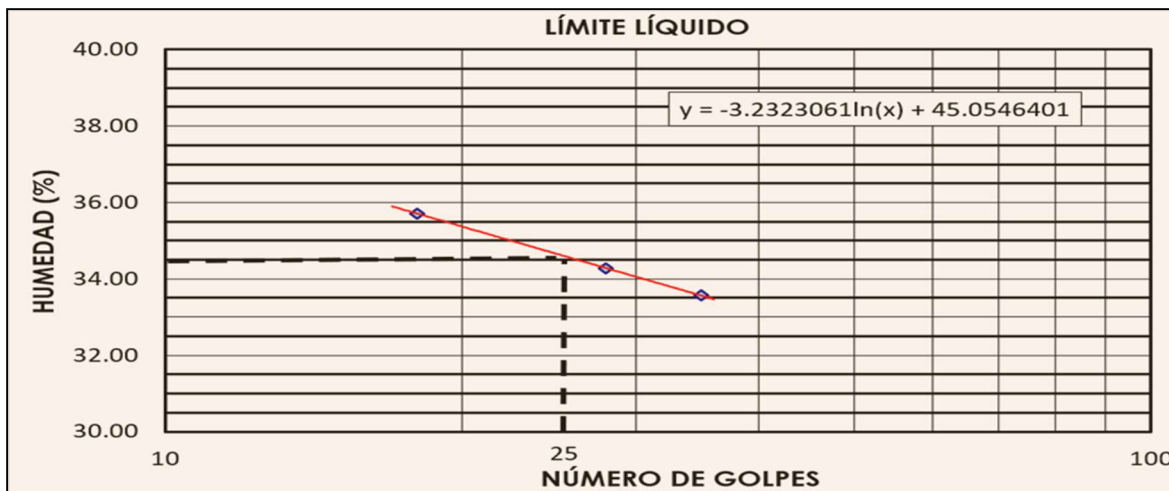
Procedimiento:

En este ensayo se aplica el método multipunto. Para ello, utilizando una espátula flexible de 75 mm de largo y ancho de 20mm se esparce una porción de la muestra húmeda en la cuchara de Casagrande, de tal manera que quede uniforme hasta formar una capa de aproximadamente 1 cm de altura. Durante este procedimiento, es importante compactar bien el material y evitar la presencia de aire, ya que estas generan alteraciones en los resultados. Posteriormente, se traza una ranura en la parte central con el ranurador, de modo que se observe con claridad la separación del material. Después, se acciona la manivela para poner en movimiento la copa a una velocidad de 2 golpes por segundo desde 10mm de alto y se registra el número de golpes necesarios para que la ranura se cierre en una longitud de 13 mm. Con el fin de obtener un resultado más confiable, deben realizarse tres ensayos. El primero debe ubicarse entre 25 y 35 golpes, el segundo entre 20 y 30, y el tercero entre 15 y 25 golpes. Finalmente, con los datos obtenidos, se determina el contenido de humedad de la muestra mediante la fórmula correspondiente, lo que permite obtener el resultado final.

$$W(\%) = \frac{\text{peso del suelo humedo} - \text{peso del suelo seco}}{\text{peso del suelo seco}} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (4)$$

Figura 3

Representación semilogarítmica del límite líquido para 25 golpes



Nota. En este gráfico se presenta la representación semilogarítmica del límite líquido. Elaboración propia.

- Límite Plástico

El límite plástico es una prueba fundamental que nos ayuda a conocer el umbral hídrico en el que el suelo comienza a perder su plasticidad y comienza a fisurarse al ser moldeado en rollos de 3.2 mm. Este ensayo ayuda a clasificar el tipo de suelo, ya que nos brinda información de su capacidad para deformarse. Este ensayo nos brinda información para conocer cómo los suelos finos, la cuales están compuestas por pequeñas partículas y vacíos, responden cuando se encuentran con la humedad. (MTC, 2016).

Equipos:

Para realizar el ensayo, se requiere un equipo especializado que incluye vidrio esmerilado, que proporciona la superficie ideal para formar los rollitos o cilindros del material sin que se deslicen. También es importante tener una espátula para ajustar la muestra y un contenedor de porcelana donde se guardarán las muestras para su secado. La balanza electrónica de alta precisión es esencial para obtener pesos exactos, y el horno a una temperatura constante es clave para secar correctamente las muestras sin que pierdan humedad o se alteren durante el proceso.

Muestra:

La muestra utilizada en este ensayo debe ser cuidadosamente tamizada utilizando un tamiz N° 40. Este proceso es crucial para garantizar que solo se utilicen las partículas que han pasado a través del tamiz, eliminando cualquier material que no cumpla con el tamaño requerido para el ensayo. Este paso asegura que el ensayo se realice con material homogéneo y consistente, lo que es esencial para obtener resultados precisos.

Procedimiento:

El procedimiento comienza moldeando la muestra en forma de tubular con los dedos sobre un vidrio esmerilado. Esto le da la forma cilíndrica requerida para la prueba. Si la muestra no desarrolla agrietamientos antes de llegar a un diámetro de 3,2 mm, el proceso debe repetirse hasta que se obtengan las grietas adecuadas. Este paso es importante porque las grietas a esa medida indican el comportamiento esperado del material. Una vez que la muestra ha sido secada en el horno, se pesa para obtener los resultados finales. La expresión que se utiliza para determinar el límite plástico (LP).

$$LP = \frac{\text{peso del suelo humedo} - \text{peso del suelo seco}}{\text{peso del suelo seco}} \times 100 \quad (5)$$

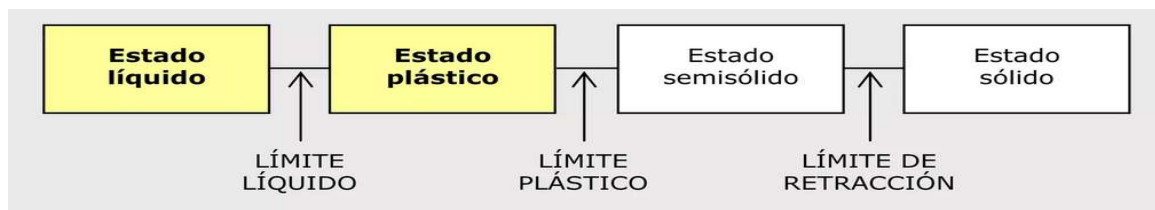
- Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) es un parámetro indispensable en ingeniería civil para identificar cómo se comporta un suelo frente a los cambios de humedad. En términos simples, permite conocer qué tanto puede deformarse un suelo sin llegar a romperse. Cuando el IP es mayor que 20, se trata de un suelo con alta plasticidad, generalmente con un contenido importante de arcilla. Esto hace que sea más flexible, aunque también más sensible a las variaciones de humedad. Si el IP se encuentra entre 7% y 20%, el suelo presenta una plasticidad media, propia de materiales arcillosos con una capacidad de deformación moderada. En cambio, cuando el IP es igual o menor que 7%, la plasticidad es baja, lo que suele corresponder a suelos poco arcillosos, más estables frente a la humedad, pero menos deformables. Por otro lado, si el IP es nulo (0%), el suelo se considera no plástico, ya que no presenta deformaciones apreciables en condiciones

normales debido a la ausencia de arcilla. En el caso de los suelos de subrasante, se recomienda que el IP sea de 10% o menos. Por el contrario, cuando el IP supera ese valor, pueden presentarse problemas de expansividad y deformaciones que afecten el comportamiento estructural, por lo que resulta conveniente estabilizar o reemplazar el suelo antes de usarlo como subrasante (MTC, 2014, p. 34).

Figura 4

Diagrama de los estados de consistencia en suelos



Nota. El diagrama ilustra las transiciones entre los estados de consistencia de un suelo (Bañón & Beviá, 2000).

El Índice de Plasticidad (IP) se calcula utilizando la fórmula.

$$IP = LL - LP \quad (6)$$

3.2.4. *Propiedades mecánicas*

Las propiedades mecánicas del suelo son importantes para garantizar la estabilidad de cualquier estructura civil, esto debido a que las propiedades dictan cómo el suelo responderá ante cargas que se le apliquen. Ensayos como los triaxiales, que miden la resistencia al corte, y los de consolidación, que determinan la compresibilidad del suelo, son esenciales para entender su comportamiento bajo presión. Además, el ensayo Proctor modificado nos permite evaluar la densidad seca del suelo y asegurar que esté lo suficientemente compactado para resistir las cargas de una estructura. El ensayo de relación de soporte California (CBR) es usado principalmente en proyectos viales para asegurarse de que el suelo pueda resistir las cargas del tráfico y prevenir deformaciones. Para poder diseñar infraestructuras adecuadas, duraderas y seguras, es necesario un análisis de estas propiedades, permitiendo minimizar el riesgo de fallas estructurales y optimizar los costos de construcción a largo plazo (INDOT, 2019).

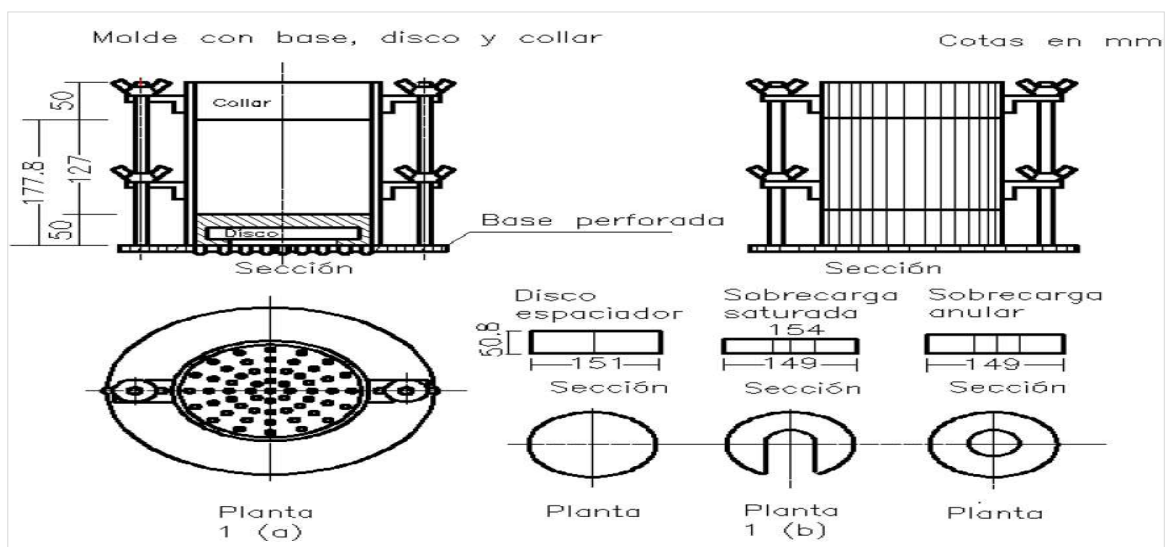
- Ensayos de relación de soporte de California (CBR)

El ensayo CBR, basado en la norma MTC E132, permite calcular la resistencia del material ensayado, en relación con su uso como material de subrasante para la construcción de obras viales. El objetivo es determinar su capacidad de soporte mediante penetraciones estándar de 0.1" y 0.2" bajo cargas de 1000 lb/plg² y 1500lb/plg² o 70.31kgf/cm² y 105,46kgf/cm² respectivamente. Los ensayos se realizan con 12, 25 y 56 golpes, lo que permite calcular un índice de resistencia para estimar el comportamiento del suelo bajo cargas de servicio. (MTC, 2016).

El ensayo CBR es un método fundamental para estimar la capacidad de resistencia de cargas de un suelo compactado, para ello se compara su rendimiento con un CBR de un 100% obtenido por la piedra chancada. Este ensayo resulta útil para suelos con partículas de hasta 19mm, lo que permite confirmar si el suelo es adecuado para resistir el peso del tráfico sin comprometer la estabilidad de la infraestructura. (Wimalasena & Gallage, 2022).

Figura 5

Esquema del cilindro para pruebas de CBR



Nota. Esta figura muestra una ilustración detallada del cilindro metálico de 6" de diámetro utilizado para realizar pruebas de CBR (MTC, 2016, p. 249).

Para el ensayo, es necesario contar con equipos específicos que garanticen la precisión y confiabilidad de los resultados. Entre ellos, se requiere un dispositivo de prensado con capacidad de 44,5 kN (10,000 lbf), sea manual o automática, capaz de no variar de una velocidad de 0,05" por minuto entre la base y la cabeza. El molde debe tener 6" de diámetro y 7" de altura, con un collarín de 2 pulgadas para un ajuste adecuado. Además, se utiliza un martillo de 4,5 kg para la compactación, un espaciador de metal, y herramientas para enrasar y nivelar la muestra. El uso de papel filtro es fundamental en cada molde, así como una placa metálica perforada de 1.6mm profundidad con vástago regulable y tornillo central. También se requieren pesas metálicas ranuradas de 2.27 kg y pesa con masa de 4.54kg con alta precisión y un deformímetro con lectura precisa de 0.01 mm. Finalmente, se utiliza un tanque de agua para la de inmersión de las muestras. (MTC, 2016).

El cálculo de la expansión en el ensayo CBR se realiza mediante una fórmula que ayuda a evaluar cómo el suelo responde cuando se le somete a presión. Con este cálculo, se puede determinar si el material tiene la capacidad de resistir cargas pesadas sin sufrir daños significativos, lo cual resulta esencial en el diseño y construcción de carreteras y otras infraestructuras que requieren una subrasante estable:

$$\% \text{ Expansión} = \frac{L_f - L_i}{h} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

L_i , L_f : lecturas inicial y final (L_i y L_f) (mm)

h : altura de molde

Procedimiento:

La muestra, junto con las pesas, debe colocarse en la base de la prensa CBR, verificando que su posicionamiento sea adecuado para evitar desalineaciones durante el ensayo. Es importante ajustar el equipo de manera que la muestra quede correctamente centrada, garantizando así una distribución uniforme de la carga inicial.

En la prensa CBR se emplean dos dispositivos de medición: uno destinado a registrar la carga aplicada sobre la muestra y otro para medir la altura de penetración producida por el pistón. Este control simultáneo permite obtener datos precisos del comportamiento del suelo durante el ensayo.

La velocidad con que penetra el pistón debe ser constante en 0.05" por minuto, asegurando que el proceso sea uniforme y preciso para obtener resultados fiables.

Se tiene que realizar las lecturas de acuerdo con las especificaciones detalladas en la Tabla 6, siguiendo los parámetros establecidos para asegurar la correcta interpretación de los datos y el cálculo del CBR.

Tabla 6

Lectura de carga (CBR)

Pulg.	mm	Esfuerzo (lb/pulg ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0.025	0.63		
0.050	1.27		
0.075	1.90		
0.100	2.54	1000 lb/pulg ²	70.31 kg/cm ²
0.125	3.17		
0.150	3.81		
0.200	5.08	1500 lb/pulg ²	105.46 kg/cm ²
0.300	7.62		
0.400	10.16		
0.500	12.70		

Nota. Datos de lectura de carga para pruebas CBR (MTC, 2016).

Para realizar el cálculo a una penetración mediante una expresión que relaciona la resistencia del suelo con la deformación ejercida por el dial, se usa la formula:

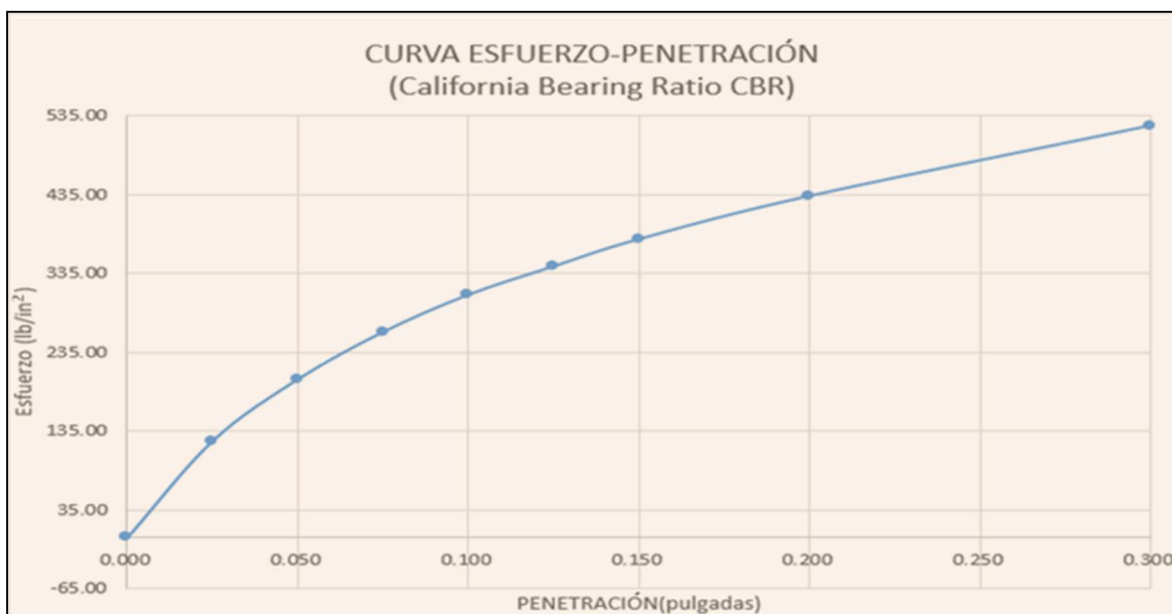
$$CBR = \frac{\text{Esfuerzo en el suelo ensayado}}{\text{Esfuerzo patrón } (1000 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2})} \times 100 \quad (8)$$

A partir del resultado obtenido, se construye la curva que establece la relación de CBR y su densidad seca del suelo, el valor de este se determina considerando el 95% de

la máxima densidad seca, tal como se ilustra en las figuras 6 y 7. Esta representación gráfica permite evaluar el comportamiento del suelo en condiciones cercanas a su estado óptimo de compactación.

Figura 6

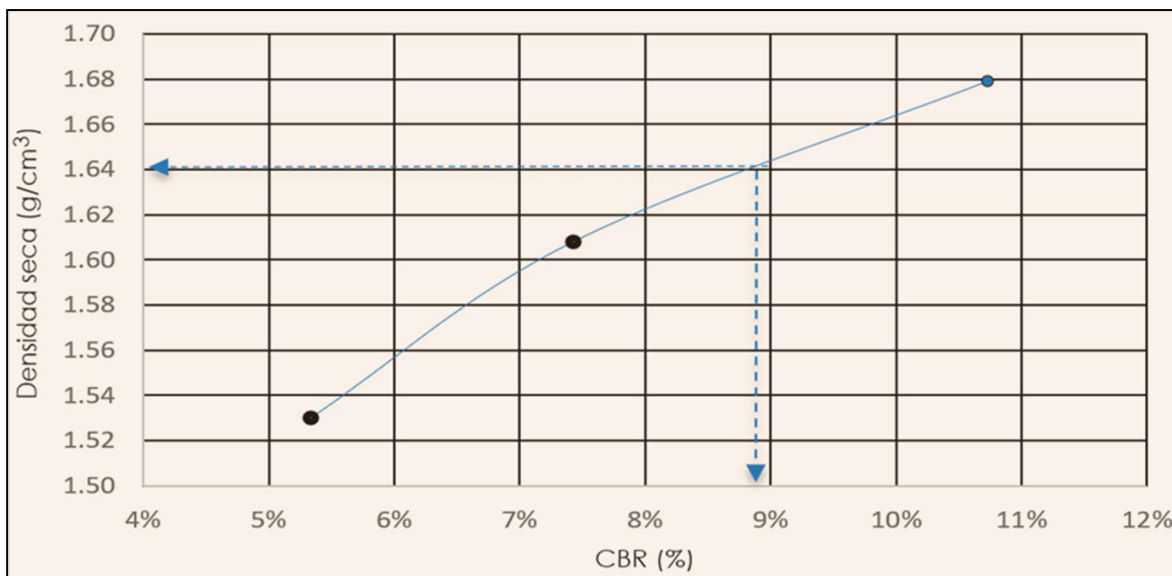
Gráfico de esfuerzo vs penetración para 12, 26 y 55 golpes



Nota. Representación del gráfico de esfuerzo y penetración. Elaboración propia.

Figura 7

Densidad seca vs CBR



Nota. Representación gráfica de la densidad seca frente al CBR. Elaboración propia.

- Proctor modificado

En proyectos viales, el ensayo Proctor modificado juega un papel esencial, ya que garantiza que el suelo alcance un nivel adecuado compactado para permitirle resistir las cargas vehiculares y los factores del entorno. A diferencia del Proctor estándar, este ensayo emplea mayor energía de compactación, usando un pisón de 4.54 kg que se deja caer desde una altura de 18", el cual permite obtener mayores valores de densidad con un menor contenido de humedad. Procedimiento adecuado al tratarse de componentes finos, los cuales requieren una mayor energía para mejorar su comportamiento. Al garantizar una adecuada capacidad de soporte, este ensayo contribuye a evitar problemas como asentamientos y deformaciones. (INDOT, 2019).

La compactación del suelo se realiza aplicando una energía mejorada de 2700 kN-m/m³ (56000 lb-pie/pie³), las cuales reduce vacíos, para esta manera mejorar las propiedades mecánicas del suelo. Este varía en tres métodos A, B, C. En el método A, el material es previamente tamizado por la malla N.º 4 y compactado en un molde de 4" de diámetro, en cinco capas con 25 golpes por cada una. En el método B, se utiliza el material pasante por la malla 3/8" cumpliendo el requisito que el 20% del material es retenido en el tamiz Nº4 y menos del 20% no pasa el de 3/8", manteniendo el mismo número de capas y golpes. Por su parte, el método C considera el material que pasa por el tamiz de 3/4", empleando un molde de 6" de diámetro, donde se compacta en cinco capas aplicando 56 golpes por capa. Cabe mencionar que este se debe realizar con 4 especímenes en las cuales se varíen progresivamente la variación del contenido de agua. Este ensayo resulta fundamental para evaluar el comportamiento del suelo frente a cargas, siendo clave en el diseño de obras de infraestructura (MTC, 2016).

Tabla 7

Selección de método Proctor modificado

Parámetro	Proctor modificado
Capas	5

Parámetro		Proctor modificado		
Esfuerzo		$5.49 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$		
Pisón		Peso = 44.5 N		
Método		A	B	C
Diámetro	-	4 pulg	4 pulg	6 pulg
Molde				
Golpes		25	25	56
Granulometría		N° 4	3/8"	3/4"
Usos		Ret. Tamiz N°4 $\leq 20\%$.	Ret. Tamiz N°4 $> 20\%$ y Tamiz 3/8" $\leq 20\%$.	Ret. Tamiz 3/8" $> 20\%$ y Ret. Tamiz 3/4" $\leq 30\%$.

Nota. Método Proctor modificado: selección de técnicas (MTC, 2016).

Materiales:

- Tamices con tamaños de malla de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " y N°4.
- Cucharas
- Espátula

Equipos:

- Moldes cilíndricos de 4" y 6" de diámetro las cuales tengan un alto de 0.018" que pueda albergar un volumen 944cm^3 .
- Un pison utilizado como mecanismo de impacto, el cual tiene un peso de 4.54 kg ($10 \pm 0,02 \text{ lb}$).
- Un artefacto con capacidad de ponderación digital con precisión de 1 g.
- Un artefacto acondicionado para mantener una temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Procedimiento:

El procedimiento se inicia seleccionando el molde adecuado según el método a emplear (A, B o C), en función de los resultados de la distribución granulométrica, procurando que los incrementos no superen el 4%, con el fin de aproximarse al contenido óptimo y trazar la curva de compactación. Para los métodos A y B se requiere un mínimo de 2.3 kg de suelo previamente tamizado, mientras que el método C demanda aproximadamente 5.9 kg; antes de iniciar, se registra el peso del molde vacío y se procede

con el ensamblaje del collarín en la base. La compactación se ejecuta en cinco capas de espesor uniforme y, una vez concluida, se retira el collarín y se enraza la superficie del espécimen con una regla metálica; finalmente, se registra el peso del conjunto molde-especimen y se extrae una muestra representativa para determinar el contenido de humedad. (MTC, 2016)

Cálculos:

La fórmula a continuación permite calcular la cantidad de agua estimada en porcentaje en relación del peso seco de la muestra.

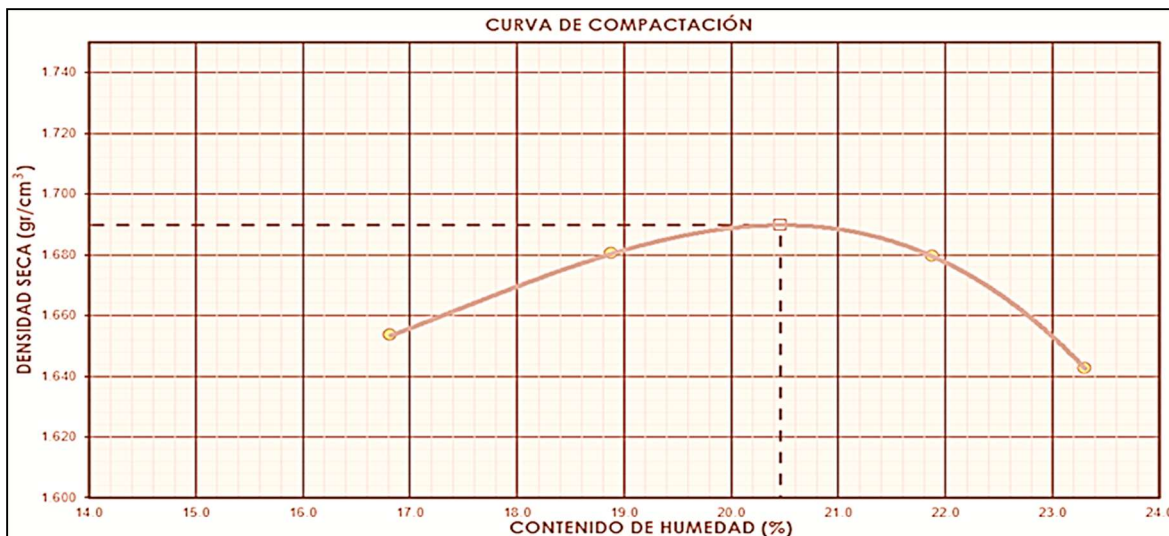
$$\% \text{ de agua} = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso material seco}} \times 100 \quad (9)$$

La expresión para el cálculo de la densidad seca, comienza con la medición de la densidad húmeda, dado que este valor es crucial para su correcto calculo:

$$\rho_{\text{húmeda}} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{(\text{peso del molde} + \text{suelo compactado}) - \text{peso del molde}}{\text{volumen del molde}} \quad (10)$$

$$\rho_{\text{seca}} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{\rho_{\text{húmeda}}}{1 + \frac{\% \text{ Agua}}{100}} \quad (11)$$

La curva de compactación es el grafico mediante el cual relaciona el contenido de humedad con la densidad del suelo seco. Constituyendo una herramienta fundamental que permite determinar el contenido óptimo de humedad necesario durante los ensayos de compactación y el punto donde el suelo alcanza su máxima densidad, lo cual resulta clave para mejorar la estabilidad y la resistencia del suelo en proyectos de construcción.

Figura 8*Representación gráfica de la compactación*

Nota. Curva de compactación en función del contenido de humedad. Elaboración propia.

3.3. Definición de términos

Arcillas: Son partículas muy finas, menores a 0,002 mm, formadas por la alteración de rocas y minerales, con características físicas y químicas particulares. (MTC, 2018).

Asentamiento: Se refiere al desplazamiento vertical del suelo, producido por factores como la aplicación de cargas, cambios en el contenido de humedad o una compactación inadecuada, lo cual puede afectar la estabilidad de las estructuras (MTC, 2018).

Análisis granulométrico: ensayo que da como resultado las fracciones de gravas, arenas y finos, útil para caracterizar su composición y textura. (MTC, 2018).

Bache: Depresión en la superficie de rodadura originada por desgaste vehicular y deterioro localizado del pavimento, que compromete la seguridad via. (MTC, 2018).

Calicata: Excavación realizada con fines de estudio geotécnico, que permite analizar y comprender la composición estratigráfica y características del suelo en distintas profundidades. (MTC, 2018).

CBR: Índice que mide la capacidad del suelo de resistir la penetración ejercida por una carga, evaluando su capacidad de soporte. (MTC, 2018).

Suelos expansivos: Son suelos, generalmente arcillosos, que presentan variaciones de volumen al cambiar su contenido de humedad. (MTC, 2018).

Compactación: Es el procedimiento que disminuye la porosidad del suelo, aumentando su densidad y estabilidad. Puede realizarse de forma manual o mecánica y es esencial para asegurar la resistencia del terreno. (MTC, 2018).

Curva granulométrica: Gráfico del análisis de partículas que indica la distribución de tamaños; el eje horizontal representa los tamices y el vertical el porcentaje acumulado que pasa. (MTC, 2018).

Densidad: Relaciona la cantidad de masa presente en un volumen específico; clave para evaluar la capacidad de un suelo de soportar cargas. (MTC, 2018).

Límite líquido: Humedad a la cual un suelo pasa de estado plástico a líquido, señalando su comportamiento frente al agua. (MTC, 2018).

Límite plástico: Contenido de agua en el que el suelo se encuentra entre plástico y semisólido, útil para determinar manejabilidad y deformabilidad. (MTC, 2018).

Subrasante: Superficie terminada del movimiento de tierras el cual constituye el cimiento de la estructura del pavimento, asegurando su vida útil y la estabilidad (MTC, 2018).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

4.1.1. Tipo de investigación

según Borja (2016), la investigación de tipo aplicada se orienta a resolver o solventar problemas específicos dentro de una realidad concreta, mediante la utilización práctica del conocimiento científico. Su enfoque está en la aplicación práctica e inmediata, orientada a encontrar soluciones efectivas mediante estrategias prácticas. Además, pretende implementar sus contribuciones para mejorar estrategias y acciones específicas, fomentando la creatividad y la innovación. Se tiene como propósito de esta investigación el ser útil y aplicable, contribuyendo a la mejora de la realidad o a la resolución de problemas dentro de un contexto de estudio (p. 10).

Esta tesis se enmarca en la investigación aplicada, ya que se aborda un problema concreto: la baja calidad de los suelos de contenido arcilloso a lo largo de la Av. Miraflores en Abancay. La solución propuesta consiste en utilizar ceniza de fibra de coco como estabilizador para mejorar propiedades como el índice de plasticidad, la máxima densidad seca y el Índice de Soporte de California (CBR). De tal forma que esta no solo responda a un requerimiento técnico de ingeniería civil, siendo también sostenible gracias al uso de residuos orgánicos. La investigación esta apoyada en los principios de la mecánica de suelos, la geotecnia y normatividad vigente para los ensayos de laboratorio, garantizando así su aplicabilidad práctica y contribuyendo a mejorar el desempeño del suelo y la infraestructura vial.

4.1.2. Nivel de investigación

Según lo descrito por Arias (2006), el nivel de investigación explicativa se centra en entender las razones que subyacen a los acontecimientos, explorando la relación las que la causa y sus efectos. Abordando así este enfoque tanto en el problema como los efectos, especialmente en estudios experimentales, a través de la formulación y la comprobación de la hipótesis. Al finalizar este tipo de estudios, las conclusiones obtenidas brindan una

comprensión más amplia y detallada del tema, enriqueciendo el conocimiento sobre los procesos investigados (p. 26).

La presente tesis está en el nivel explicativo, ya que no solo se limita a medir las propiedades físico-mecánicas del suelo arcilloso estabilizado con ceniza de fibra de coco, sino que también se busca comprender y explicar aquellas causas que dan paso a las mejoras observadas. Esto mediante ensayos experimentales, se analiza cómo la incorporación de este material influye en parámetros como el índice de plasticidad, la máxima densidad seca y la relación de soporte de California (CBR). Siendo así en este sentido, el estudio trasciende la simple descripción de resultados, al enfocarse en identificar los mecanismos físicos y mecánicos que explican las variaciones registradas, proporcionando un entendimiento de la interacción entre el suelo arcilloso y el material cenizo de la fibra de coco como material estabilizante.

4.1.3. *Diseño de investigación*

El diseño de investigación es experimental, ya que según Borja (2016), este enfoque se centra en contrastar la hipótesis mediante la alteración deliberada de la variable independiente para observar el cómo afecta a la variable dependiente. Este tipo de diseño ayuda a facilitar la identificación de relaciones entre la causa y el efecto entre las variables, asegurando así resultados confiables mediante un control adecuado de las condiciones del experimento. (p. 26).

4.2. *Ámbito temporal y espacial*

4.2.1. *Temporal*

Su ámbito temporal de la presente tesis está definido al año 2025, donde se abarcan todas las fases del estudio, las cuales se incluyen desde la recolección de muestras del suelo hasta la ejecución de los ensayos en laboratorio y la interpretación final de los resultados obtenidos. Este marco temporal permite asegurar que todos los procedimientos y análisis se realicen dentro del periodo establecido, proporcionando una perspectiva actualizada.

4.2.2. Espacial

La investigación se realizó en la Av. Miraflores, cubriendo el tramo que va desde la progresiva Km 0+000 hasta la progresiva Km 1+000, dentro del distrito de Abancay, en la provincia de Abancay, región Apurímac.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población, es también conocida como universo, las cuales hace referencia al grupo total de sujetos, elementos o unidades que forman parte de un estudio de investigación. Este grupo constituye el conjunto sobre el cual se desea obtener información y realizar generalizaciones, y puede incluir personas, objetos, eventos o cualquier otro tipo de elemento relevante para la investigación (Borja, 2016, p. 30).

La población de estudio está debidamente definida y es correspondiente a la subrasante ubicada entre el kilómetro 0+000 y el kilómetro 1+000 de la Av. Miraflores, de la ciudad de Abancay, región Apurímac. Se ha seleccionado esta población debido a la importancia de este tramo en la evaluación del estado del suelo y su ligazón con el comportamiento de la vía.

4.3.2. Muestra

La muestra es un segmento proporcional representativo de la población, elegido de forma deliberada o siguiendo criterios específicos, con el fin de reflejar sus características principales. Los datos obtenidos permiten hacer inferencias y generalizaciones sobre la tendencia de toda la población. (Borja, 2016, p. 30).

Según la Norma Técnica CE.010 de Pavimentos Urbanos (2010), es recomendable realizar un mínimo de tres puntos de investigación. En la presente tesis, se seleccionaron tres puntos de investigación en la subrasante de la Av. Miraflores, ubicada en la ciudad de Abancay, identificadas y etiquetadas como C-01, C-02 y C-03. Las muestras se recolectaron en puntos estratégicos del tramo estudiado para garantizar que se

representaran de manera precisa y equilibrada las condiciones del suelo, reflejando las variaciones del terreno a lo largo de la zona.

4.3.3. Muestreo

En el muestreo no probabilístico, la selección de las unidades que componen la muestra se lleva a cabo en función de criterios definidos por el investigador, sin garantizar que todos los miembros de la población tengan la misma probabilidad de ser seleccionados. Este tipo de muestreo se emplea cuando se cuenta con conocimiento previo de la población o cuando se requiere obtener información de manera más práctica y accesible, en función de los objetivos del estudio (Martínez, 2012, p. 9).

En el desarrollo de esta tesis, se identificaron tres puntos de investigación en la subrasante, según lo estipulado por la Norma Técnica CE.010, la cual establece que, en el caso de una vía local, deben realizarse al menos tres puntos de investigación. La normativa establece que por cada 1800 m² corresponde un punto de investigación; sin embargo, al tratarse de un área de 5000 m², se decidió realizar tres puntos de investigación para cumplir con los requerimientos y aseverar la representatividad de los resultados.

Para la recolección de muestras en la vía estudiada, se excavaron tres calicatas hasta 1.50 m de profundidad, obteniendo así tres muestras características del suelo. En las cuales fueron acarreadas al laboratorio para la realización de los ensayos correspondientes. Los análisis se llevaron a cabo utilizando tanto el suelo arcilloso de la Av. Miraflores como la ceniza de fibra de coco, con la cantidad de material calculada según los ensayos previamente planificados. El procedimiento de los ensayos se llevó a cabo conforme al manual de ensayos de materiales y las cantidades de material que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8

Cantidad total de muestra de suelo y ceniza para los ensayos de laboratorio

Tipo de material	Peso (kg)
------------------	-----------

Suelo	250
Ceniza (fibra)	15
Total	265

Nota. Cantidad total de muestra de suelo y ceniza para los ensayos de laboratorio.

Elaboración propia.

4.4. Instrumentos

4.4.1. Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos utilizados en la investigación comprenden los medios mediante los cuales se recolecta y registra la información vinculada a las variables de estudio las cuales incluyen cuestionarios, entrevistas, observaciones, hojas de campo, registros fotográficos o videográficos, y escalas de medición. Estos instrumentos permiten recopilar información detallada y precisa sobre las variables vinculadas al estudio, ya sea de forma cuantitativa, a través de datos numéricos, o cualitativa, mediante descripciones y percepciones. La elección del instrumento adecuado depende del enfoque de la investigación y de las características de los datos que se necesitan recolectar, como en estudios experimentales, descriptivos o exploratorios (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, p. 199).

Se emplearon formatos de ensayos para registrar todos datos y hallazgos obtenidos durante la realización de los ensayos, así mismo se usaron herramientas informáticas como tablas Microsoft Excel y mi Microsoft Word para los procesamiento de datos y análisis de la información. De igual manera, el registro fotográfico fue fundamental para evidenciar el desarrollo de los ensayos y respaldar la validez de los datos recopilados. En cuanto a los ensayos de laboratorio, se utilizaron formatos específicos de mecánica de suelos, los cuales se detallan a continuación:

Tabla 9*Instrumentos utilizados para cada ensayo*

Descripción del ensayo	Nombre del instrumento	Norma técnica utilizado
Límites de consistencia	Formato de límite líquido y	MTC E 110
	límite plástico	MTC E 111
Proctor modificado	Formato de Proctor modificado	MTC E 115
CBR	Formatos de CBR	MTC E 132

Nota. Instrumentos y normas para los ensayos de laboratorio. Elaboración propia.

4.4.2. Técnica de recolección de datos

La observación constituye un método de obtención de información basada en la percepción sistemática y controlada de fenómenos, siendo indispensable en ingeniería registrar la información de manera precisa mediante formatos estructurados que garanticen la veracidad y confiabilidad de los resultados (Borja, 2016, p. 33).

En esta tesis, se utiliza la técnica de observación para recolectar los datos necesarios. Esta técnica permite medir, registrar y documentar adecuadamente los resultados, utilizando los formatos estándares de recolección de datos empleados en el laboratorio de suelos.

4.5. Procedimientos

4.5.1. Procedimientos estadísticos

Dentro del ámbito del análisis estadístico, las pruebas de hipótesis son herramientas esenciales para poner a prueba las afirmaciones sobre las características numéricas de la población. La formulación de las hipótesis de manera exacta es fundamental, debido que estas en el análisis estadístico determinará si serán aceptadas o rechazadas, dependiendo de los resultados obtenidos a partir de los datos (Martínez, 2012, p. 324).

En la presente tesis es considerada y tomada en cuenta tanto la hipótesis nula como la hipótesis alternativa, ya que la aceptación o rechazo se basa de acuerdo a los objetivos planteados en cada prueba estadística. Para poder validar las hipótesis, se emplearon pruebas paramétricas, específicamente la distribución t de Student, con el propósito de comparar las medias de dos muestras. Este enfoque se adoptó debido a la necesidad de evaluar el efecto inducido por la incorporación de ceniza de fibra de coco sobre las propiedades del suelo analizado.

4.6. Análisis de datos

a) Planteamiento de la hipótesis

Las herramientas como la prueba de hipótesis, sirven para poner a prueba afirmaciones sobre los parámetros de una población. La hipótesis nula sugiere que no existe significancia entre las condiciones estudiadas, en cambio, la hipótesis alterna sugiere que los datos hallados proporcionan significancia para poder rechazar la hipótesis nula. Una prueba unilateral verifica si el parámetro es mayor o menor que el valor de referencia, tomándose en cuenta si va a la derecha o a la izquierda según a lo indicado anteriormente. En cuanto a una prueba bilateral investiga si los parámetros son diferentes sin asumir si la diferencia es mayor o menor. (Martínez, 2012).

Se optó por una prueba bilateral debido a la necesidad de determinar el efecto de la adición de ceniza de fibra de coco en el suelo arcilloso sin asumir una dirección específica del cambio. Dado que dicha adición puede generar variaciones tanto positivas como negativas en las propiedades del suelo, esta permite analizar ambos escenarios de manera integral. De esta forma, se evalúan posibles modificaciones en parámetros como la resistencia y la plasticidad, asegurando un análisis completo del comportamiento del material. El uso de una prueba bilateral garantiza que se consideren todas las posibles variaciones derivadas de la interacción entre la ceniza y el suelo.

$$H_0 : [\mu_x = \mu_y]$$

$$H_a : [\mu_x \neq \mu_y]$$

Donde:

H_0 = Hipótesis nula, que sugiere que no hay diferencia ni efecto.

H_a = Hipótesis alternativa, que plantea que sí hay una diferencia o efecto.

b) Estadístico

El nivel de significancia, representado por alfa, suele fijarse en valores comunes como 1%, 5% o 10%, aunque este valor puede ajustarse según las necesidades de la investigación, teniendo en cuenta el nivel de confianza deseado y el contexto del estudio. El nivel de significancia se fijó en 5% para cada cola, lo que da un total de 10% de significancia y 90% de confianza. Esto significa que, si los resultados caen fuera del 90% de la zona aceptable, podrían indicar diferencias significativas. La región crítica se determinó utilizando el valor "t" tabulado, basado en el tamaño de la muestra y el nivel de confianza. Este valor define el rango dentro del cual los resultados se consideran estadísticamente significativos.

Para comparar las medias de dos muestras, se utilizó la distribución "t" de Student, y el estadístico correspondiente se calculó aplicando la fórmula detallada a continuación, que considera tanto las medias como las varianzas de las muestras:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

$$t = s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 2} = \frac{(n_1 - 1)s_x^2 + (n_2 - 1)s_y^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

t : El estadístico t calculado, representado como t_c .

$\bar{x}$: La media de la primera muestra, que no contiene ceniza de fibra de coco.

$\bar{y}$: La media de la segunda muestra, que contiene la ceniza de fibra de coco.

n_1 : El tamaño de la primera muestra (sin ceniza de fibra de coco).

n_2 : El tamaño de la segunda muestra (con ceniza de fibra de coco).

s_x^2 : La varianza de la primera muestra.

s_y^2 : La varianza de la segunda muestra.

s^2 : La varianza agrupada.

Para realizar una prueba de hipótesis utilizando la distribución t de Student, se requiere la siguiente información:

$gl = (n_1 + n_2 - 2)$ grados de libertad.

Donde:

n_1 = es el número de datos en la muestra sin incorporación de ceniza de fibra de coco.

n_2 = es el número de datos en la muestra con incorporación de ceniza de fibra de coco.

α = El nivel de significación (denotado como α) es un valor que se establece previamente y se utiliza para determinar las zonas de rechazo y aceptación en el gráfico de la distribución t.

4.7. Consideraciones éticas

A medida que avanza la investigación, se acataron criterios éticos de base, tales como la transparencia, la responsabilidad, el compromiso y el respeto por la propiedad intelectual. En este sentido, todas las fuentes de información fueron citadas adecuadamente conforme a las normas APA, evitando cualquier forma de plagio y garantizando el reconocimiento de los autores consultados.

El desarrollo de la tesis se sustentó en lineamientos técnicos y éticos, tomando como referencia el manual de ensayos de materiales del MTC, el cual otorga una base metodológica confiable para la ejecución de los ensayos. La aplicación de estos criterios permitió obtener resultados consistentes, válidos y reproducibles. De igual manera, el manejo adecuado de los datos, bajo principios de integridad y transparencia, contribuyó a la confiabilidad de la investigación, asegurando un análisis riguroso y una interpretación precisa de los resultados obtenidos.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1. *Ubicación de la vía y muestreo de material*

Es de vital importancia identificar las áreas que cuenten con condiciones favorables para asegurar su estabilidad estructural y lograr una subrasante bien conformada para pavimentos. Para ello se requiere evaluar propiedades del suelo como su resistencia, índice de plasticidad y aptitud de drenaje, comprobando que cumplan con los lineamientos de la normativa vigente. Además, el material debe tener suficiente de soporte, ya que esto condiciona la eficiencia y la vida de servicio.

El trabajo de campo realizado estuvo centrado en identificar suelos arcillosos en la Av. Miraflores, en Abancay, con el objetivo de evaluar la fiabilidad para la infraestructura vial. Dado que las propiedades del suelo pueden variar dentro del área, para ello se determinaron tres estaciones de muestreo de tal forma que se obtengan muestras fidedignas de la subrasante. Estos puntos fueron codificados como C-01, C-02 y C-03, lo que facilitó el control y análisis de la heterogeneidad del terreno.

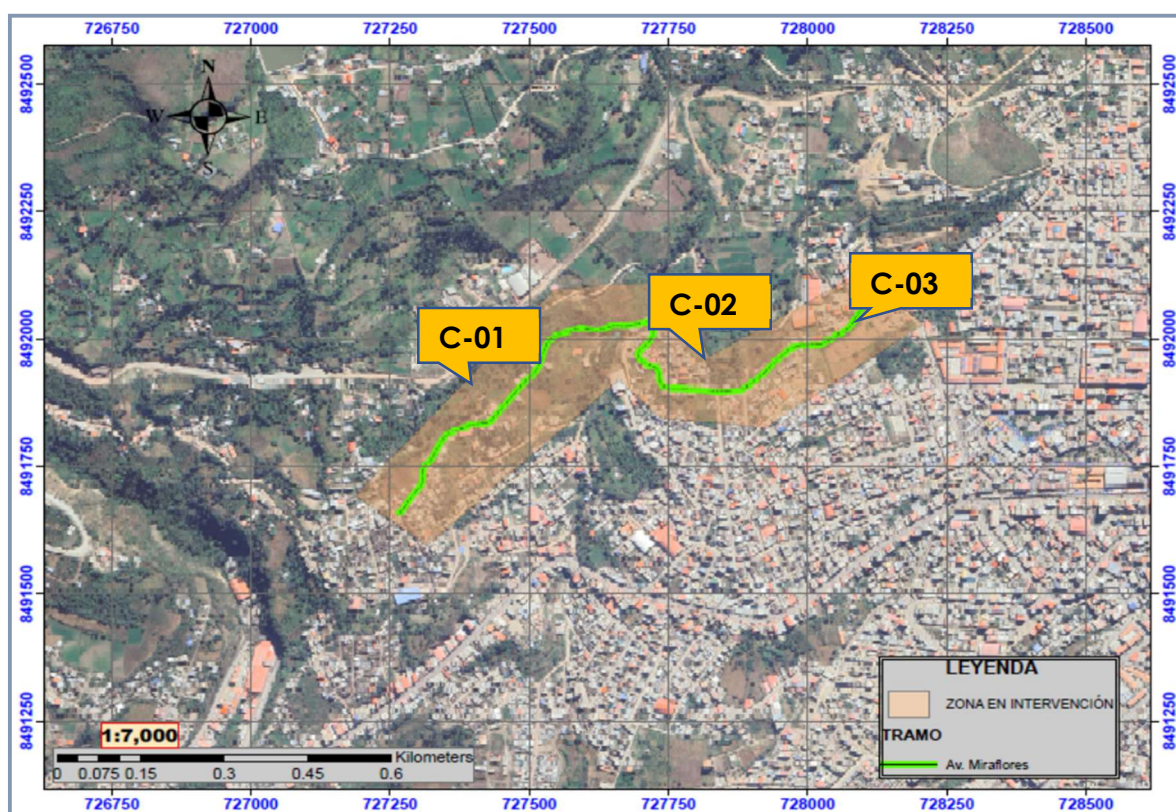
Las muestras obtenidas fueron acarreadas al laboratorio bajo condiciones de conservación, con el fin de preservar sus características originales. Posteriormente, se realizaron diversos ensayos de laboratorio siguiendo los procedimientos establecidos en los manuales del MTC y las normas técnicas vigentes. Estos ensayos permitieron determinar propiedades fundamentales del suelo, tales como la capacidad de soporte, la plasticidad y la granulometría, las cuales son determinantes para evaluar su comportamiento y verificar su idoneidad como material de subrasante.

El análisis granulométrico, por ejemplo, permitió establecer los diferentes tamaños de las partículas que compone el suelo, información clave para entender su comportamiento frente a procesos de compactación y aplicación de cargas.

De igual manera, la evaluación de la plasticidad permite comprender la capacidad del suelo para deformarse sin perder su cohesión, aspecto clave en su comportamiento frente a deformaciones permanentes. Los resultados obtenidos a partir de estos ensayos permiten determinar si el material cumple con los lineamientos normativos para su utilización como subrasante, en concordancia con las exigencias técnicas vigentes. Este análisis contribuye a asegurar un adecuado desempeño estructural de la vía, favoreciendo su durabilidad y reduciendo la necesidad de intervenciones de mantenimiento a futuro.

Figura 9

Mapa de ubicación de calicatas en la Av. Miraflores



Nota. Localización de calicatas para el estudio. Elaboración propia.

Las calicatas para este estudio fueron localizadas a lo largo de la Av. Miraflores, en Abancay, Apurímac, en lugares seleccionados de manera estratégica para representar la diversidad del terreno. Las coordenadas exactas son las siguientes:

- C1 Este: 727464.00, Norte: 8491876.28
- C2 Este: 727889.21, Norte: 8491902.24

- C3 Este: 728077.45, Norte: 8492025.13

5.1.2. Muestreo de calicatas

Durante la recolección de muestras en los pozos de exploración, se verificó en ella que el material extraído fuera lo suficientemente representativo para la ejecución de los ensayos programados. Permitiendo así obtener resultados de laboratorio más confiables y precisos. Asimismo, se adoptaron medidas para conservar las condiciones originales del suelo, evitando alteraciones o contaminaciones durante su manipulación. Cada muestra fue debidamente identificada y codificada, lo que facilitó su control y trazabilidad a lo largo del proceso, garantizando la consistencia de los datos y una adecuada interpretación de los resultados.

Tabla 10

Asignación de códigos para las muestras

Codificación	Descripción
C-01	Muestra 1
C-02	Muestra 2
C-03	Muestra 3

Nota. Descripción y codificación de las muestras. Elaboración propia.

5.1.3. Estudio de las propiedades físicas y mecánicas

Este estudio permite comprender cómo responden frente a distintas condiciones y cargas, verificando su cumplimiento con los requisitos técnicos y asegurando un adecuado desempeño y durabilidad en obra.

Para caracterizar las muestras y cumplir con los objetivos de la investigación, se realizaron ensayos conforme a las normas vigentes aplicables a materiales de subrasante. Los resultados obtenidos proporcionan información confiable sobre el comportamiento del suelo. Entre los ensayos efectuados se incluyen el análisis granulométrico, contenido de

humedad, límites de consistencia, Proctor modificado y CBR. Asimismo, se evaluó la incorporación de ceniza de fibra de coco en diferentes dosificaciones, evidenciándose incrementos en la capacidad de soporte y una mayor estabilidad frente a deformaciones.

5.1.4. Análisis granulométrico MTC E 107

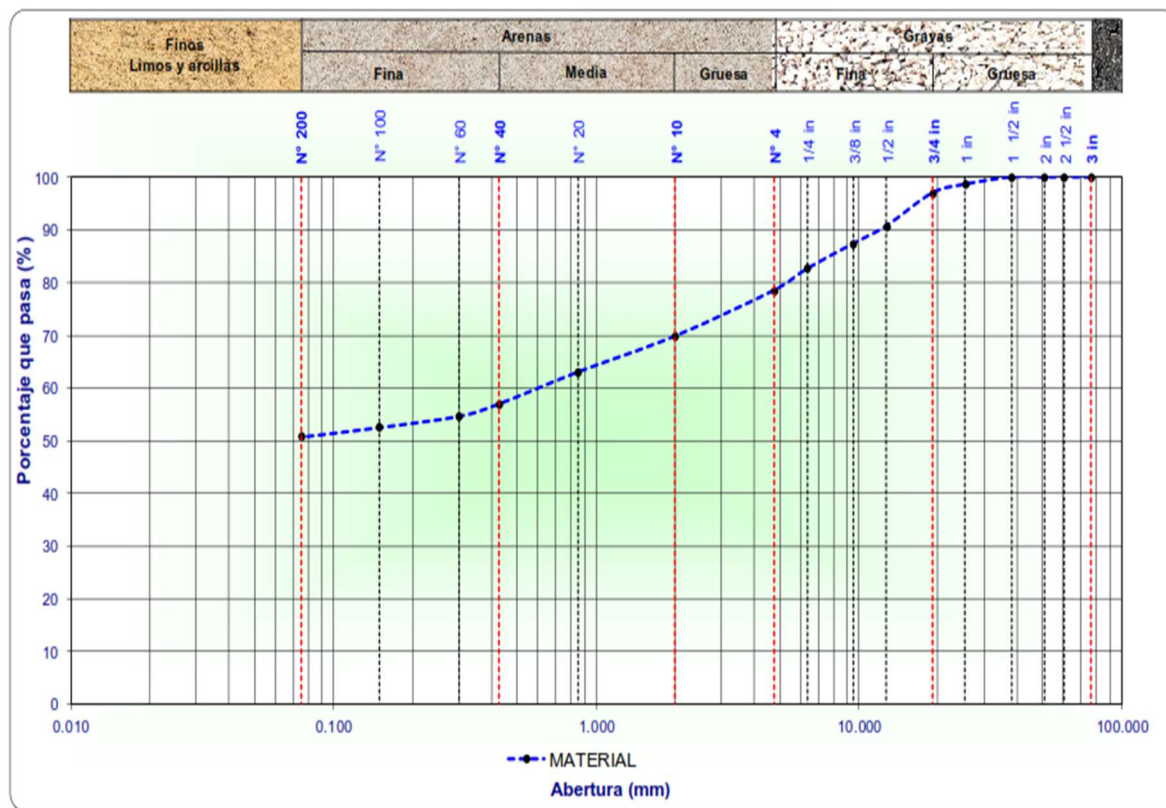
En la siguiente tabla se presentan los resultados del análisis de la distribución granulométrica.

Tabla 11

Distribución granulométrica de las calicatas

		Calicata		
		C-01	C-02	C-03
Tamiz	Abertura (mm)	% Que Pasa	% Que Pasa	% Que Pasa
3"	76.200	100.00	100.00	100.00
2 1/2"	60.350	100.00	100.00	100.00
2"	50.800	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00
1"	25.400	98.61	96.30	100.00
3/4"	19.050	96.97	92.47	98.77
1/2"	12.700	90.71	91.12	95.08
3/8"	9.525	87.38	90.34	91.54
1/4"	6.350	82.63	89.10	82.46
Nº4	4.750	78.53	87.94	74.87
Nº10	2.000	69.88	81.82	54.52
Nº20	0.850	63.02	64.49	39.14
Nº40	0.425	56.97	41.39	28.77
Nº60	0.300	54.64	32.61	24.39
Nº100	0.149	52.49	25.33	19.15
Nº200	0.075	50.69	20.04	14.80

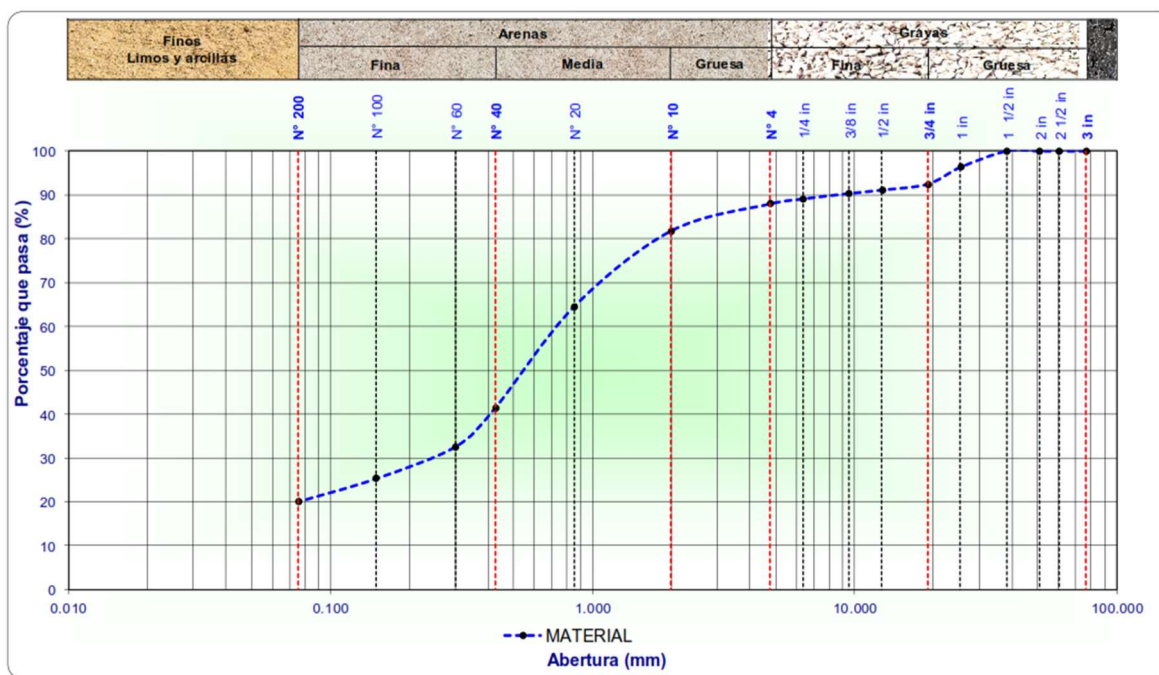
Nota. Distribución granulométrica de las calicatas según tamiz. Elaboración propia.

Figura 10*Curva granulométrica C-01*

Nota. Distribución granulométrica C-01.

la curva granulométrica correspondiente a la calicata C-01 se muestra un dominio de distribución de partículas finas, en las cuales es evidenciado por un 50.69% de material pasante del N°200. Esto indica que es un suelo arcilloso con una cantidad considerable de partículas pequeñas, lo que afecta su capacidad de drenaje y su plasticidad. La mayor concentración de finos podría hacer que el suelo sea más susceptible a deformaciones.

Figura 11*Curva granulométrica C-02*

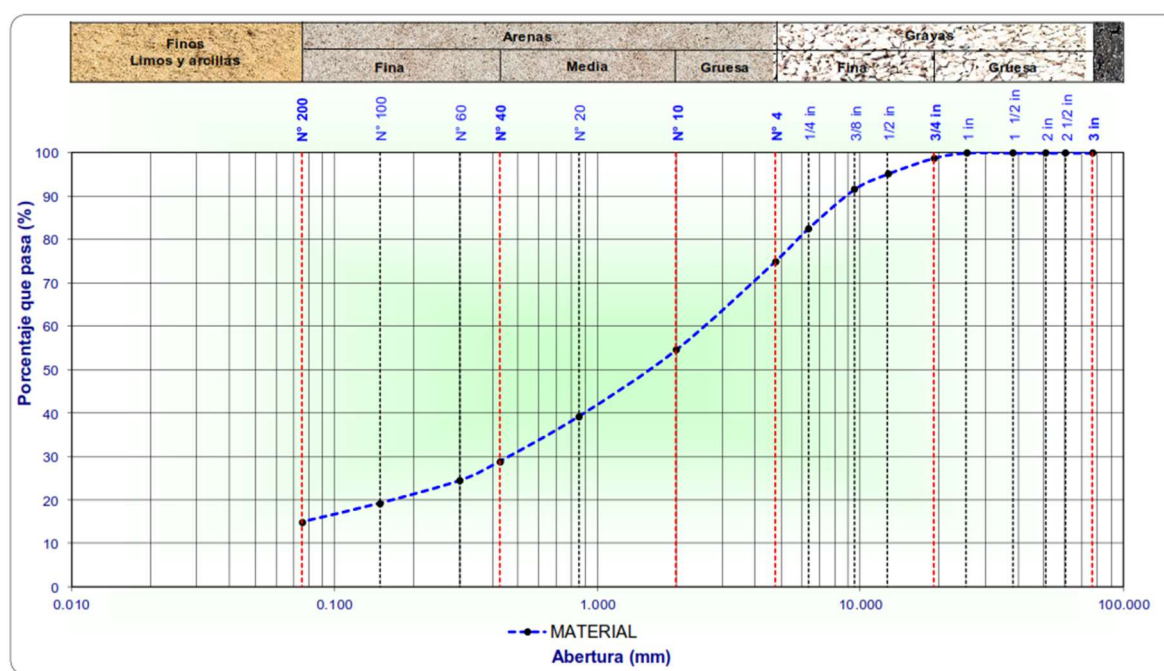


Nota. Distribución granulométrica C-02.

La curva de C-02, presenta un suelo con una gran proporción de arena, alcanzando un 69.06%. Los finos representan solo el 20.04%, lo que sugiere un suelo menos plástico que el de C-01. Este tipo de suelo es más estable y menos propenso a la expansión.

Figura 12

Curva granulométrica C-03



Nota. Resultados del análisis granulométrico de la calicata C-03. Elaboración propia.

La curva de C-03 es similar a la de C-02, con un alto contenido de arena (67.66%) y una baja proporción de finos (14.80%). Este tipo de suelo es más arenoso y menos susceptible a la plasticidad.

Las diferencias entre los tres gráficos radican principalmente en la composición y distribución granulométrica. Siendo la C-01 con mayor contenido de finos, muestra un perfil más plástico, lo que lo hace menos adecuado para estructuras de alta carga sin estabilización. La C-02 tiene una mayor cantidad de arena, lo que mejora la estabilidad y la capacidad de drenaje, pero sigue siendo susceptible a la compresión bajo cargas pesadas. C-03 es el más adecuado de los tres, ya que su alto contenido de arenas y gravas lo hace más resistente y estable, con una menor susceptibilidad a cambios volumétricos, ideal para estructuras más exigentes. De acuerdo con las propiedades obtenidas, la calicata C-01 es la que necesita estabilización, ya que su contenido de finos y su plasticidad moderada la hacen menos apta para soportar las cargas de un pavimento sin tratar, requiriendo una estabilización mecánica o el uso de aditivos para mejorar su capacidad de carga y resistencia.

Resultados de las calicatas

Tabla 12

Resumen de los resultados de ensayos para la caracterización de suelos

Especificaciones	Resultados		
	C-01	C-02	C-03
Profundidad	1.5	1.5	1.5
Grava (%)	17.37	10.90	17.54
Arena (%)	31.93	69.06	67.66
Finos (%)	50.69	20.04	14.80
Contenido de humedad (%)	11.54	10.45	8.90
Límite líquido (%)	33.06	32.02	22.61

Límite plástico (%)	21.85	27.61	20.49
Índice de plasticidad (%)	11.21	4.42	2.12
Arcilla			
Clasificación SUCS	arenosa de baja plasticidad (CL)	Arena limo arcillosa (SC-SM)	Arena limosa con grava (SM)
Clasificación AASHTO	Suelo Arcilloso A-6 (2)	Grava y Arena Limosa o Arcillosa A-2-4 (0)	Fragmentos de roca, Grava y Arena A-1-b (0)
Densidad máxima seca (g/cm ³)	1.892	1.985	1.913
Humedad óptima (%)	10.33	9.85	8.45
CBR al 95% MDS	3.90	8.36	6.97

Nota. Resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio. Elaboración propia.

Se evidencian que el suelo de subrasante presenta condiciones que limitan su desempeño en infraestructura vial. En la calicata C-01, se registró un índice de plasticidad de 11.21%, valor que supera el límite recomendado por el MTC (<10%), indicando una plasticidad media asociada a un alto contenido de finos (50.69%), lo que incrementa su susceptibilidad a deformaciones; además, su CBR de 3.90% la clasifica como una subrasante inadecuada a insuficiente. En la calicata C-02, el índice de plasticidad es de 4.42%, dentro del rango aceptable; sin embargo, su CBR de 8.36% la ubica como una subrasante regular, evidenciando una capacidad de soporte limitada. De manera similar, la calicata C-03 presenta un índice de plasticidad de 2.12%, considerado bajo, pero su CBR de 6.97% también la clasifica como subrasante regular. En conjunto, los resultados demuestran que el suelo natural de C-1 no cumple completamente con los requisitos técnicos exigidos por el MTC, en las cuales es justificante la necesidad de aplicar un proceso de estabilización.

5.1.5. Adiciones de ceniza de fibra de coco al suelo arcilloso

Para cumplir con los objetivos planteados, se aplicaron diferentes proporciones de ceniza de fibra de coco previamente tamizada, lo que permitió analizar su efecto sobre las propiedades físico-mecánicas del material. La experimentación detallada facilitó identificar el porcentaje más adecuado de adición, evidenciando cómo influencia en el comportamiento del suelo y permitiendo optimizar su desempeño y estabilidad para su aplicación como subrasante.

Se realizaron diferentes dosificaciones de suelo arcilloso con ceniza de fibra de coco, tal como se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13

Proporciones de ceniza de fibra de coco para material arcilloso

% ceniza de fibra de coco	Muestra
2%	C-01
4%	C-01
6%	C-01
8%	C-01
10%	C-01

Nota. Se detalla en esta tabla el porcentaje de ceniza de fibra de coco agregado a la muestra C-01. Elaboración propia.

5.1.6. Valores obtenidos para el índice de plasticidad (IP)

Esta información es fundamental para evaluar su respuesta bajo diferentes condiciones ambientales y optimizar su aplicación en proyectos de ingeniería geotécnica.

Tabla 14

Índice de plasticidad en suelos con ceniza de fibra de coco

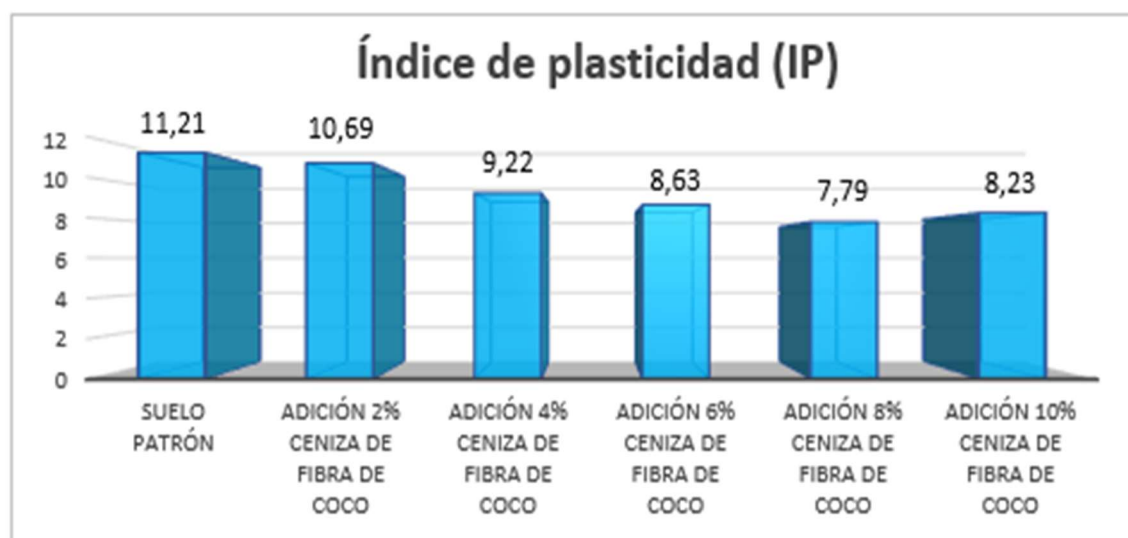
Combinación suelo- ceniza de fibra de coco	LL (%)	LP (%)	IP (%)
C-01(Patrón)	33.06	21.85	11.21
Suelo + 2% de ceniza de fibra de coco	31.84	21.15	10.69
Suelo + 4% de ceniza de fibra de coco	29.94	20.72	9.22

Suelo + 6% de ceniza de fibra de coco	27.98	19.34	8.63
Suelo + 8% de ceniza de fibra de coco	27.43	19.64	7.79
Suelo + 10% de ceniza de fibra de coco	27.95	19.72	8.23

Nota. La adición de ceniza de fibra de coco reduce el índice de plasticidad a medida que aumenta el porcentaje de ceniza. Elaboración propia.

Figura 13

Índice de plasticidad del suelo con adiciones de ceniza de fibra de coco



Nota. Gráfico de variación del índice de plasticidad con adición de ceniza de fibra de coco. Elaboración propia.

Los resultados hallados indican que la adición de ceniza de fibra de coco genera una reducción progresiva el índice de plasticidad (IP). El valor del IP pasó de 11.21% en la muestra sin ceniza a 10.69% con un 2% de ceniza, 9.22% con un 4%, 8.63% con un 6%, 7.79% con un 8%, y finalmente a 8.23% con un 10% de ceniza. Esta tendencia confirma que la adición de ceniza reduce la plasticidad del suelo, disminuyendo la sensibilidad a cambios volumétricos asociados a variaciones en el contenido de humedad. Esto se debe a que la ceniza de fibra de coco, al ser un material de naturaleza no cohesiva, modifica la estructura del suelo al reducir la interacción entre las partículas finas de arcilla, lo que limita su capacidad de deformación plástica. Asimismo, la incorporación de ceniza contribuye a disminuir la retención de agua y la expansión del suelo, mejorando su estabilidad. En consecuencia, el material tratado presenta condiciones más favorables para su uso como

subrasante, al adquirir un comportamiento menos plástico y más estable frente a sollicitaciones externas.

5.1.6. Resultados del ensayo Proctor modificado

Esta información es clave para asegurar que el material alcance la resistencia y estabilidad necesarias frente a las cargas de diseño, reduciendo el riesgo de deformaciones. Asimismo, facilita la toma de decisiones durante el proceso constructivo, permitiendo ajustar las condiciones de compactación según las características del terreno. De esta manera, se garantiza un adecuado desempeño estructural y una mayor durabilidad de la infraestructura, minimizando la aparición de asentamientos y fallas asociadas a una compactación deficiente.

Tabla 15

Resultados del ensayo de Proctor para suelos con diferentes proporciones de ceniza de fibra de coco.

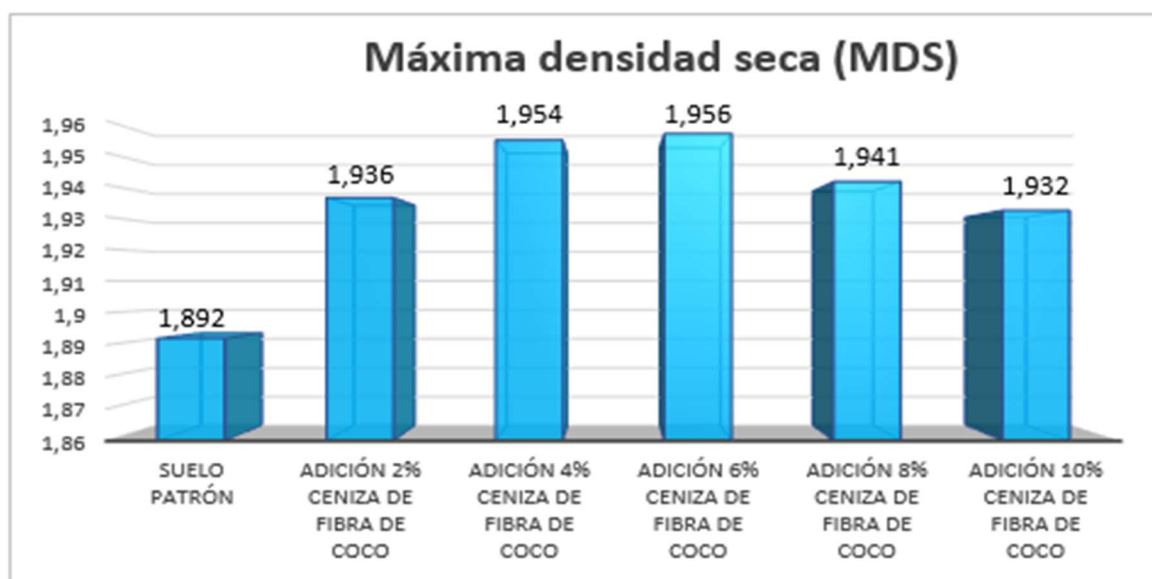
suelos más ceniza de fibra de coco (%)	Humedad optima	Máxima densidad seca (MDS)
C-01(Patrón)	10.33 %	1.892 g/cm ³
Suelo + 2% de ceniza de fibra de coco	11.29 %	1.936 g/cm ³
Suelo + 4% de ceniza de fibra de coco	12.22 %	1.954 g/cm ³
Suelo + 6% de ceniza de fibra de coco	13.56 %	1.956 g/cm ³
Suelo + 8% de ceniza de fibra de coco	14.79 %	1.941 g/cm ³

Suelo + 10% de		
ceniza de fibra de	16.69 %	1.932 g/cm ³
coco		

Nota. La tabla muestra cómo el incremento en el porcentaje de ceniza de fibra de coco afecta la máxima densidad seca del suelo. Elaboración propia.

Figura 14

Máxima densidad seca del suelo con ceniza de fibra de coco



Nota. Se observa que la máxima densidad seca del suelo muestra un leve aumento con la incorporación de ceniza de fibra de coco. Elaboración propia.

Los resultados mostrados en la figura 14 indican que el efecto de la ceniza influye de manera positiva en la máxima densidad seca. Donde se observan incrementos escalonados desde 1.892 g/cm² de la muestra original hasta 1.936 g/cm² en adición de un 2% del estabilizador. 1.954 g/cm³ con 4% y un valor máximo de 1.956 g/cm³ con 6%. A partir de este punto, la densidad disminuye ligeramente a 1.941 g/cm³ y 1.932 g/cm³ para 8% y 10%, respectivamente, se identifica que la dosificación óptima se encuentra alrededor del 6%, donde se alcanza la mayor densidad seca.

La densidad máxima seca aumenta porque la ceniza, al ser un material más liviano, ayuda a que las partículas del suelo se distribuyan uniformemente durante la

compactación, mejorando la estructura y la compactación general. Sin embargo, cuando la proporción de la ceniza llega al 10%, la MDS experimenta una ligera disminución, lo que podría deberse a que cantidades mayores de ceniza dificultan que el suelo se compacte de manera óptima, reduciendo la densidad máxima alcanzable.

5.1.7. Resultados del ensayo CBR (suelo con ceniza de fibra de coco)

Los ensayos de CBR (Índice de Capacidad de Soporte de California) se realizaron en concordancia a los procedimientos estipulados en la normativa MTC E 132. Para ello, se prepararon tres muestras de suelo arcilloso, las cuales fueron compactadas utilizando el contenido de humedad óptimo previamente determinado mediante el ensayo Proctor modificado. Con el fin de simular diferentes niveles de compactación representativos de condiciones de campo, se aplicaron energías de 55, 26 y 12 golpes por capa. Seguido a ello, las muestras fueron sometidas a un proceso de saturación durante un periodo de 4 días, con el objetivo de evaluar su comportamiento en condiciones críticas de humedad. Finalizado este proceso, las probetas fueron ensayadas en la prensa CBR mediante la aplicación de carga controlada, registrando la resistencia a la penetración y obteniendo así los valores necesarios.

Tabla 16

CBR al 95% de la MDS con las adiciones de ceniza de fibra de coco al suelo arcilloso

Combinación suelo- ceniza de fibra de coco	CBR al 95% de la MDS (%)
C-03(Patrón)	3.90
Suelo + 2 % de ceniza de fibra de coco	6.07
Suelo + 4 % de ceniza de fibra de coco	11.29
Suelo + 6 % de ceniza de fibra de coco	12.55

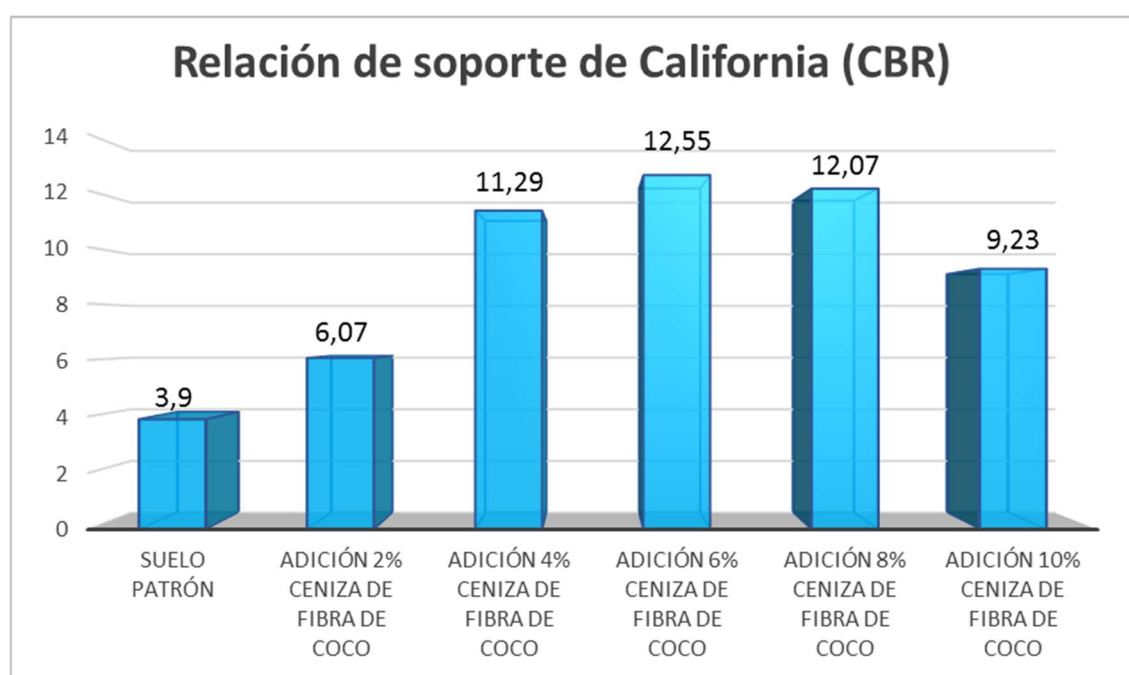
Suelo + 8 % de ceniza de fibra de coco	12.07
Suelo + 10 % de ceniza de fibra de coco	9.23

Nota. La incorporación de ceniza de fibra de coco mejora la capacidad de carga del suelo.

Realización propia.

Figura 15

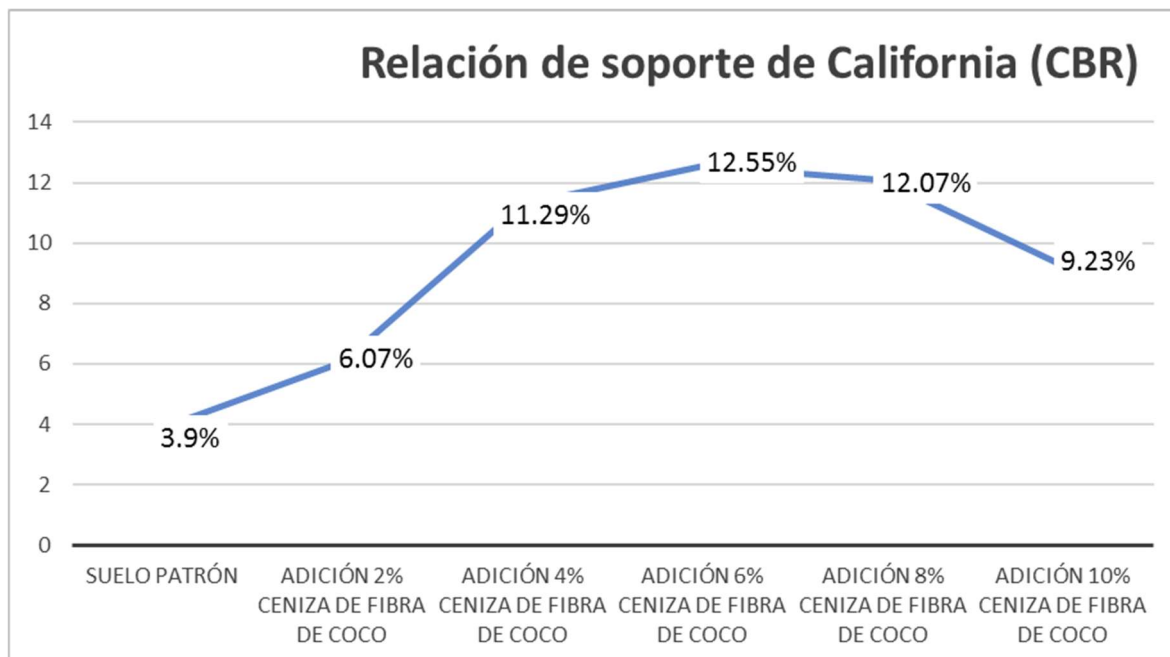
Resultado CBR con ceniza de fibra de coco en suelos arcillosos



Nota. El gráfico ilustra cómo el CBR del suelo aumenta progresivamente con la adición de ceniza de fibra de coco. Elaboración propia.

Figura 16

Evolución del CBR con diferentes niveles de ceniza de fibra de coco



Nota. Esta figura ilustra la evolución del CBR del suelo con la adición de ceniza de fibra de coco, mostrando un aumento progresivo. Elaboración propia.

Los resultados mostrados en la figura 15 detalla como varía según las distintas concentraciones de la ceniza de fibra de coco en un suelo arcilloso. El valor del CBR aumenta de 3.90% en la muestra patrón a 6.07% con 2% de ceniza, 11.29% con 4% y alcanza su valor máximo de 12.55% al 6%, indicando sustancialmente su mejora en la resistencia del material. Pese a ello, al incrementar la dosificación a 8% y 10%, el CBR disminuye ligeramente a 12.07% y 9.23%, respectivamente, sugiriendo una disminución en su eficiencia del proceso de estabilización. Este comportamiento se explica porque, en proporciones moderadas, la ceniza mejora la estructura del suelo, aumentando la resistencia; mientras que, en contenidos elevados afectan negativamente la capacidad de carga. En consecuencia, se identifica que la dosificación óptima corresponde al 6% de ceniza de fibra de coco, ya que permite alcanzar el mayor valor de CBR.

Resumen de resultados de las adiciones de ceniza de fibra de coco al suelo arcilloso

Tabla 17

Resultados de diversos ensayos realizados en el suelo arcilloso

Características del suelo adicionando ceniza de fibra de coco	Patrón (C-01)	Resultados				
		Adición 2% ceniza de fibra de coco	Adición 4% ceniza de fibra de coco	Adición 6% ceniza de fibra de coco	Adición 8% ceniza de fibra de coco	Adición 10% ceniza de fibra de coco
Límite líquido (%)	33.06	31.84	29.94	27.98	27.43	27.95
Límite plástico (%)	21.85	21.15	20.72	19.34	19.64	19.72
Índice de plasticidad (%)	11.21	10.69	9.22	8.63	7.79	8.23
Densidad máxima seca (g/cm ³)	1.892	1.936	1.954	1.956	1.941	1.932
Humedad óptima (%)	10.33	11.29	12.22	13.56	14.79	16.69
CBR al 95% de la MDS	3.90	6.07	11.29	12.55	12.07	9.23

Nota. Resultados de ensayos en suelos arcillosos con ceniza de fibra de coco. Realización propia.

5.2. Discusión de resultados

La evaluación inicial del suelo de la calicata C-01 evidenció un CBR de 3.90%, valor inferior al mínimo de 6% establecido por el MTC, evidenciando la disconformidad de los requisitos para ser utilizado como subrasante debido a su baja capacidad de soporte; además, presenta un índice de plasticidad de 11.21%, superior al límite recomendado (<10%), lo que refleja una susceptibilidad a cambios volumétricos. Ante esta situación, se incorporaron cantidades de material cenizo de fibra de coco (2%, 4%, 6%, 8% y 10%), observándose una mejora significativa en las propiedades del suelo, evidenciada por la reducción del IP a valores menores al 10% a partir del 4% de adición, así como un incremento en la MDS hasta alcanzar una cifra óptimo de 1.956 g/cm³ con 6% de ceniza. De manera consistente, el CBR aumentó progresivamente hasta un máximo de 12.55%

con 6%, superando el valor mínimo exigido por el MTC; sin embargo, al incrementar la dosificación por encima de este porcentaje, se observa una ligera disminución en la densidad y en la capacidad de soporte, lo que evidencia que una saturación de ceniza influye desfavorablemente la compactación del suelo. En virtud de lo anterior, se identifica como diseño óptimo el 6%, ya que permite mejorar integralmente las propiedades físico-mecánicas del suelo, demostrando que estabilizar con material cenizo de fibra de coco es una alternativa viable y eficiente para su uso en subrasantes.

a) Respecto al valor de índice de plasticidad (IP):

La calicata C-01 en estado natural presentó un valor de 11.21%, el cual supera el límite recomendado para subrasantes ($<10\%$), evidenciando una plasticidad moderada. Con la incorporación del material cenizo en proporciones de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, el IP disminuyó progresivamente a 10.69%, 9.22%, 8.63%, 7.79% y 8.23%, respectivamente, representando reducciones de -0.52%, -1.99%, -2.58%, -3.42% y -2.98% en comparación con el suelo patrón. Esta tendencia decreciente se explica porque la ceniza de fibra de coco, al presentar menor afinidad con el agua, reemplaza parcialmente las fracciones finas responsables de la plasticidad. Asimismo, la presencia de compuestos con comportamiento puzolánico contribuye a la formación de enlaces cementantes, generando una estructura más rígida y menos susceptible a deformaciones volumétricas frente a variaciones de humedad, lo que mejora el comportamiento geotécnico del suelo.

Estos resultados son coincidentes con lo obtenido por Guzmán y Rodríguez (2021), quienes, al evaluar la adición del material cenizo de fibra de coco en proporciones de 0.6%, 1.3% y 2.0%, observaron una disminución del índice de plasticidad de 18.2% en el suelo virgen a 17.2%, 15.9% y 14.5%, respectivamente. Los autores concluyen al adicional el aditivo reduce la plasticidad del suelo al modificar su estructura y disminuir la actividad de las partículas finas. En comparación, el presente estudio no solo confirma esta tendencia, sino que evidencia una mayor reducción del IP al emplear porcentajes superiores de ceniza, alcanzando valores menores al 10% a partir del 4% de adición.

b) En lo que corresponde al valor de la máxima densidad seca (MDS):

La calicata C-01 en estado natural presentó un valor de 1.892 g/cm^3 , mientras que, con la incorporación del material cenizo en proporciones de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, se obtuvieron valores de 1.936 g/cm^3 , 1.954 g/cm^3 , 1.956 g/cm^3 , 1.941 g/cm^3 y 1.932 g/cm^3 , respectivamente. Estos valores ponen de manifiesto un incremento escalonado de la MDS hasta alcanzar un valor máximo con el 6% de adición, seguido de una ligera disminución en porcentajes mayores. Este comportamiento indica que, en proporciones moderadas, la ceniza mejora la compactación del suelo al favorecer una mejor redistribución de las partículas y reducir los vacíos internos. Asimismo, la presencia de sílice con potencial comportamiento puzolánico contribuye a la formación de enlaces entre partículas, generando una estructura más estable y densa. Sin embargo, al incrementarse la cantidad de ceniza, su menor peso específico comienza a influir negativamente, reduciendo la densidad alcanzable.

Estos resultados coinciden con lo reportado Guzmán y Rodríguez (2021), quienes, al incorporar el aditivo en proporciones de 0.6%, 1.3% y 2.0%, obtuvieron un incremento en la densidad máxima seca de 1.784 g/cm^3 en el suelo virgen a 1.835 g/cm^3 , 1.908 g/cm^3 y 1.973 g/cm^3 , respectivamente. Los autores concluyen que al adicionarse la ceniza mejora la compactación del suelo, generando un aumento en la densidad debido a una mejor interacción entre partículas. En comparación, el presente estudio confirma esta tendencia, evidenciando un incremento inicial de la MDS con la adición de ceniza; sin embargo, también permite identificar un punto óptimo en el 6%, a partir del cual la densidad disminuye ligeramente.

c) En lo que corresponde al valor de CBR:

Respecto al CBR, la calicata C-01 en estado natural presentó un valor de 3.90%, el cual se encuentra por debajo del mínimo requerido para subrasantes, evidenciando una baja capacidad de soporte. Con la incorporación de ceniza de fibra de coco en proporciones de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, se obtuvieron valores de 6.07%, 11.29%, 12.55%, 12.07% y 9.23%, respectivamente, lo que representa incrementos de 2.17%, 7.39%, 8.65%, 8.17% y 5.33% en comparación con el suelo patrón. Se observa un incremento progresivo del

CBR hasta alcanzar un valor máximo con el 6% de adición, identificándose como la dosificación óptima, ya que mejora significativamente la capacidad portante. Este comportamiento se explica porque la ceniza de fibra de coco contribuye a una mejor compactación y redistribución de las partículas, incrementando la cohesión y favoreciendo la interacción entre los componentes del suelo, permitiendo que se uniformice la distribución de cargas y una mayor resistencia a la penetración.

Estos resultados son consistentes con lo reportado Guzmán y Rodríguez (2021), quienes obtuvieron un incremento del CBR de 4.9% en el suelo natural a 7.9%, 7.3% y 7.30% con adiciones de 0.6%, 1.3% y 2.0%, respectivamente, identificando como dosificación óptima el 0.6%. De igual manera en su investigación Monteza (2021), reportó un aumento del CBR de 9.5% a 13.9%, 24.5% y 25.8% con dosificaciones de 1.5%, 5% y 8%, concluyendo una mejora significativa en la clasificación del suelo. Estos valores aumentan escalonadamente tras adicionar la ceniza de fibra de coco pasando de regular a muy buena. Asimismo, Rimachi y Sánchez (2019), evidenciaron incrementos de 5.69% a 11.25%, 11.71%, 16.54%, 18.26% y 15.8% con adiciones de 0.5%, 1.5%, 3%, 5% y 8%, determinando un óptimo del 5%. En comparación, el presente estudio confirma la tendencia general de mejora del CBR con la adición del material cenizo; sin embargo, identifica un valor óptimo del 6%, el cual permite elevar la resistencia del suelo de una condición inadecuada a una subrasante de mejor calidad, evidenciando la efectividad del material como agente estabilizante en suelos arcillosos.

5.3. Prueba de hipótesis

5.3.1. Hipótesis general

H_0 : La adición de ceniza de fibra de coco (2%, 4%, 6%, 8% y 10%) no influye significativamente en la relación de soporte de California (CBR) de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

H_a : La adición de ceniza de fibra de coco (2%, 4%, 6%, 8% y 10%) influye significativamente en la relación de soporte de California (CBR) de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

5.3.2. De la prueba de hipótesis específica

5.3.2.1. Hipótesis específica 1: resultados del material arcilloso combinado con ceniza de fibra de coco.

H_0 : $[\mu_x = \mu_y]$ La adición de ceniza de fibra de coco, no influye significativamente en el valor de índice de plasticidad de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

H_a : $[\mu_x \neq \mu_y]$ La adición de ceniza de fibra de coco, influye significativamente en el valor de índice de plasticidad de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

A. Nivel de significación

Se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0.10/2 = 0.05$, ya que se trata de una prueba de dos colas. Este nivel de significancia brinda la posibilidad de evaluar si el contraste son los suficientemente relevantes y a si validar los resultados de la prueba.

Tabla 18

Resultados estadísticos de la hipótesis específica 1

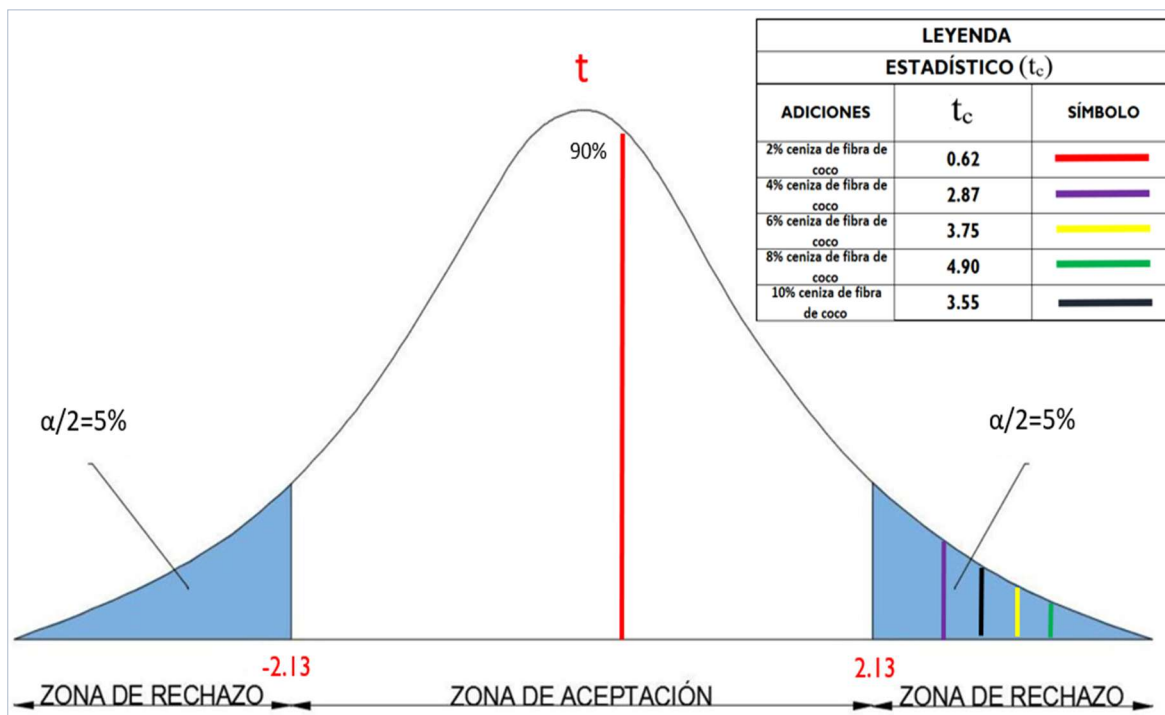
Descripción	Resultados				
	Adición 2% ceniza de fibra de coco	Adición 4% ceniza de fibra de coco	Adición 6% ceniza de fibra de coco	Adición 8% ceniza de fibra de coco	Adición 10% ceniza de fibra de coco
Nivel de significación			0.1		
Grados de libertad			4		
Valor crítico			2.13		

Región crítica	< -∞; -2.13] y [2.13; +∞>				
“t” calculado	0.62	2.87	3.75	4.90	3.55
p-valor	0.57	0.046	0.020	0.008	0.024
Condición	Si $t_c \in \text{R.C.} \Rightarrow$ Se rechaza H_0				
	Cuando t_c se encuentra dentro de la región de aceptación (R.A.) para una adición del 2% de ceniza de fibra de coco se acepta la hipótesis nula (H_0), indicando que no hay un cambio significativo en el IP.				
Decisión	Sin embargo, dado que t_c está en la región crítica (R.C.), se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a), lo que demuestra que las cantidades de 4%, 6%, 8% y 10% de ceniza de fibra de coco tienen un efecto importante sobre el IP.				

Nota. Los resultados muestran los valores del "t" calculado para diferentes proporciones de ceniza de fibra de coco. Elaboración propia.

Figura 17

Valores de la prueba de hipótesis específica 1



Nota. La figura ilustra cómo los valores de t calculados para cada concentración de ceniza de fibra de coco se distribuyen dentro de las zonas de aceptación y rechazo.

El análisis estadístico mediante la prueba t de Student, considerando un nivel de significancia de 0.10 y un valor crítico de ± 2.13 , evidencia que la adición de ceniza de fibra de coco tiene un efecto diferenciado sobre el IP. Para la dosificación del 2%, el valor de t calculado (0.62) se ubica dentro de la región de aceptación y presenta un p-valor de 0.57, por lo que no se rechaza la hipótesis nula (H_0), dando por entender que no hay un cambio estadísticamente significativo. En contraste, para las dosificaciones de 4%, 6%, 8% y 10%, los valores de t calculado (2.87, 3.75, 4.90 y 3.55) superan el valor crítico y se ubican en la región crítica, mientras que sus p-valores (0.046, 0.020, 0.008 y 0.024) son menores a 0.1, lo que conlleva al rechazo de la hipótesis nula y la aceptación de la hipótesis alternativa (H_a). En consecuencia, se demuestra que a partir del 4% de adición de ceniza de fibra de coco existe un efecto estadísticamente significativo en la reducción del IP, siendo más notable en la dosificación del 8%, lo que respalda su efectividad como material estabilizante del suelo.

5.3.2.2. De la prueba de hipótesis específica 2

$H_0: [\mu_x = \mu_y]$ La adición de ceniza de fibra de coco, no influye significativamente en el valor de máxima densidad seca de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

$H_a: [\mu_x \neq \mu_y]$ La adición de ceniza de fibra de coco, influye significativamente en el valor de máxima densidad seca de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

A. Nivel de significancia.

Se considera $\alpha = 0.10/2 = 0.05$ para un test de dos colas.

Tabla 19

Resultados del análisis estadístico de la hipótesis específica 2

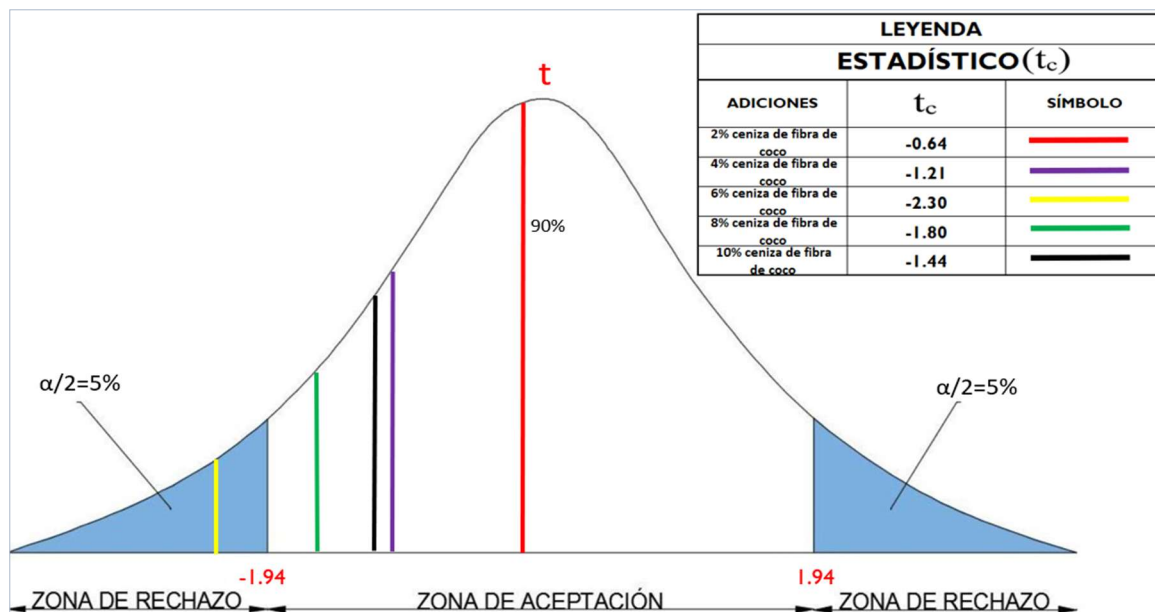
Descripción	Resultados
-------------	------------

	Adición 2% ceniza de fibra de coco	Adición 4% ceniza de fibra de coco	Adición 6% ceniza de fibra de coco	Adición 8% ceniza de fibra de coco	Adición 10% ceniza de fibra de coco
Nivel de significación			0.1		
Grados de libertad			4		
Valor crítico			1.94		
Región crítica		< -∞; -1.94] y [1.94; +∞ >			
"t" calculado	-0.64	-1.21	-2.30	-1.80	-1.44
p-valor	0.55	0.27	0.061	0.122	0.200
Condición	Si $t_c \in \text{R.C.} \Rightarrow \text{Se rechaza } H_0$				
Decisión	Dado que el 2%, 4%, 8% y 10% de ceniza de fibra de coco se encuentran en la zona de aceptación (R.A.), se acepta la hipótesis nula (H_0), lo que indica que estos porcentajes de ceniza de fibra de coco no influyen de manera significativa en la densidad seca máxima. Dado que la adición del 6% de ceniza de fibra de coco se sitúa en la región crítica (R.C.), se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a), lo que demuestra su influencia significativa en la densidad seca máxima.				

Nota. Esta tabla presenta los resultados de la prueba de hipótesis específica 2 sobre la influencia de la ceniza de fibra de coco en la densidad máxima seca del suelo. Elaboración propia.

Figura 18

Gráfico de los valores estadísticos de la hipótesis específica 2



Nota. Este gráfico visualiza los valores de t calculados para cada adición de ceniza de fibra de coco, y cómo estos valores se posicionan en relación con las zonas crítica y de aceptación.

Los hallazgos obtenidos muestran que para las dosificaciones de 2%, 4%, 8% y 10% de ceniza de fibra de coco, los valores de t_c se encuentran dentro del intervalo de no rechazo, y sus p -valores son mayores a 0.10, lo que indica que estas proporciones no generan cambios estadísticamente significativos en la MDS del suelo. En contraste, para la dosificación del 6%, el valor de t calculado excede el límite crítico establecido, ubicándose fuera del intervalo de aceptación, lo que sugiere una variación relevante; su p -valor resulta inferior al nivel de significancia, indicando que, si existe diferencia estadísticamente significativa.

5.3.2.3. De la prueba de hipótesis específica 3

$H_0: [\mu_x = \mu_y]$ La adición de ceniza de fibra de coco, no influye significativamente en el valor de CBR de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

$H_a: [\mu_x \neq \mu_y]$ La adición de ceniza de fibra de coco, influye significativamente en el valor de CBR de la subrasante en suelos arcillosos, Av. Miraflores, Abancay, Apurímac, 2025.

A. Nivel de significancia

Se considera $\alpha=0.10/2=0.05$ para un test de dos colas.

Tabla 20

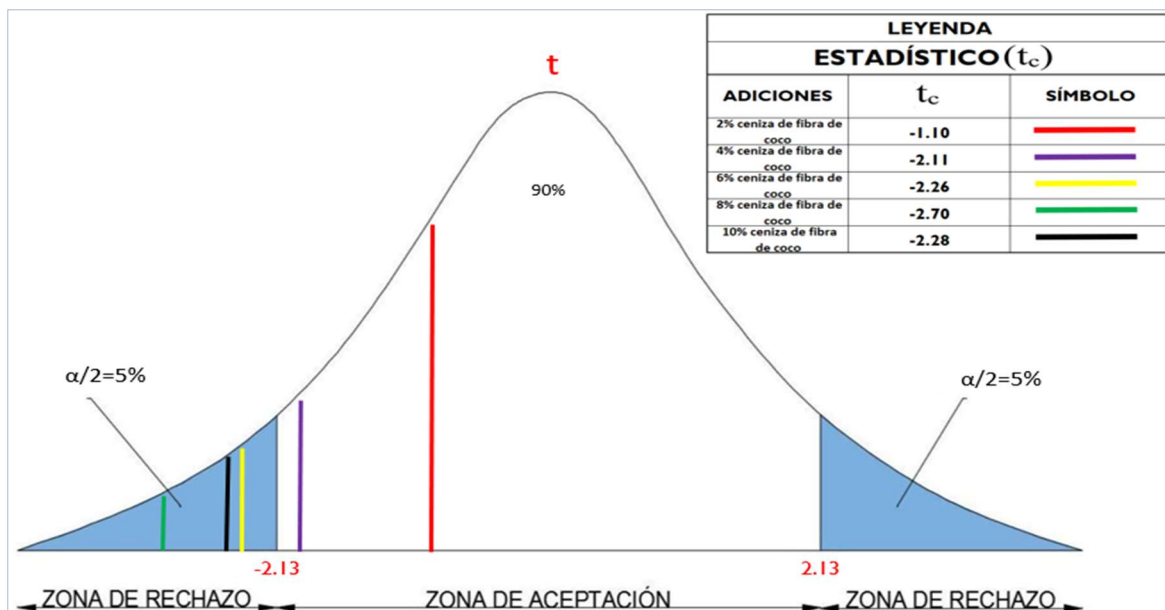
Resultados del análisis estadístico de la hipótesis específica 3

Descripción	Resultados				
	Adición 2% ceniza de fibra de coco	Adición 4% ceniza de fibra de coco	Adición 6% ceniza de fibra de coco	Adición 8% ceniza de fibra de coco	Adición 10% ceniza de fibra de coco
Nivel de significación			0.1		
Grados de libertad			4		
Valor crítico			2.13		
Región crítica		$<-\infty; -2.13]$ y $[2.13; +\infty>$			
"t" calculado	-1.10	-2.11	-2.26	-2.70	-2.28
p-valor	0.33	0.10	0.08	0.054	0.085
Condición	Si $t_c \in R.C. \Rightarrow$ Se rechaza H_0				
Decisión	La adición de 2% y 4% de ceniza de fibra de coco coloca el valor de t_c dentro de la zona de aceptación, lo que permite validar la hipótesis nula (H_0). Esto indica que estas proporciones de ceniza de fibra de coco no influyen de manera significativa en el CBR.				
	Por otro lado, al agregar 6%, 8% y 10% de ceniza de fibra de coco, el valor de t_c se encuentra en la zona crítica (R.C.), lo que lleva a rechazar la H_0 y aceptar la hipótesis alternativa, lo que significa que estos porcentajes de ceniza de fibra de coco sí tienen un impacto significativo en el CBR.				

Nota. Esta tabla resume los resultados de la hipótesis sobre el CBR del suelo con diferentes adiciones de ceniza de fibra de coco. Elaboración propia.

Figura 19

Representación gráfica de los resultados estadísticos de la tercera hipótesis



Nota. En este gráfico se muestran los valores t calculados para las concentraciones de ceniza de fibra de coco, destacando su distribución en las zonas de aceptación y rechazo con el valor crítico.

Los resultados muestran que, para las dosificaciones de 2% y 4% de ceniza de fibra de coco, los valores de t_c se ubican dentro del intervalo de no rechazo, y sus p -valores son mayores a 0.10, evidenciando que no hay diferencias estadísticamente significativas respecto al suelo patrón. En el caso de las dosificaciones de 6%, 8% y 10%, los valores de t_c superan el valor crítico en términos absolutos, lo que sugiere una diferencia; sus p -valores son exiguos a la significancia, por lo que, se puede afirmar la existencia de un efecto estadísticamente significativo. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula. No obstante, es importante destacar que los resultados correspondientes evidencian una tendencia a la significancia, coincidiendo con los mayores valores de CBR obtenidos experimentalmente.

VI. Conclusiones

Tras el procesamiento de los datos obtenidos en la ejecución de los ensayos y el análisis del comportamiento del suelo arcilloso al incorporar ceniza de fibra de coco, se establecen conclusiones relevantes que permiten comprender de manera integral el proceso de mejoramiento del material. Estas conclusiones responden directamente a las metas establecidas en la investigación y aportan información útil para su integración en la ejecución de proyectos de pavimentación. El estudio permitió determinar las implicancias positivas de la incorporación del material cenizo sobre propiedades fundamentales como la plasticidad, la densidad y CBR, así como reconocer los límites en su dosificación para evitar una disminución en el rendimiento del suelo. En este contexto, se destacan los resultados más importantes vinculados a los objetivos específicos desarrollados, los cuales constituyen un aporte técnico que puede ser considerado en futuras investigaciones y en la implementación de soluciones prácticas.

Conclusión del objetivo general

Se evaluó el efecto de la incorporación de ceniza de fibra de coco en proporciones de 2%, 4%, 6%, 8% y 10% sobre el comportamiento del suelo arcilloso, evidenciándose una optimización en su capacidad de soportar cargas en comparación con la condición natural. Los resultados mostraron un incremento progresivo del CBR respecto al suelo patrón, identificándose como dosificación más eficiente el 6%, con la cual el valor del CBR se elevó de 3.90% a 12.55%. Este incremento permite que el material pase de una condición inicial no adecuada al acatamiento de los requerimientos técnicos exigidos por el Manual de Carreteras del MTC (2014), categorizándose como material de subrasante buena.

Conclusión del objetivo específico 1

En relación con el índice de plasticidad, se determinó el efecto de la adición de ceniza de fibra de coco diferentes proporciones en el suelo arcilloso, evidenciándose una tendencia decreciente de este parámetro en las primeras dosificaciones. El valor inicial de 11.21%

disminuyó a 10.69%, 9.22%, 8.63% y 7.79% para contenidos de 2%, 4%, 6% y 8%, respectivamente, indicando una reducción en la maleabilidad del suelo. Este comportamiento se asocia a la modificación de la estructura interna del material, donde la ceniza actúa como agente de relleno y promueve la aglomeración de partículas finas, limitando su capacidad de absorber agua y reduciendo su deformabilidad. Al añadirse un 10%, se observa un leve incremento del índice de plasticidad hasta 8.23%, lo cual puede atribuirse a la presencia excesiva de finos que incrementan la interacción con el agua, disminuyendo parcialmente el efecto estabilizante. A pesar de ello, a partir del 4% de adición, los resultados registrados se sitúan dentro de lo recomendado para subrasantes, lo que evidencia que el material cenizo contribuye a mejorar el comportamiento del suelo, siendo más eficiente en proporciones intermedias donde se logra un adecuado equilibrio entre estabilidad y reducción de plasticidad.

Conclusión del objetivo específico 2

Observándose inicialmente una mejora en su capacidad de compactación en comparación con la muestra virgen. La densidad aumentó de 1.892 g/cm³ a 1.936 g/cm³, 1.954 g/cm³ y 1.956 g/cm³ para dosificaciones de 2%, 4% y 6%, respectivamente. Este incremento se debe a que, en pequeñas cantidades, la ceniza ayuda a rellenar los vacíos, permitiendo que estas se acomoden mejor y formando una estructura más compacta. Sin embargo, al aumentar la proporción de ceniza a 8% y 10%, la densidad disminuye a 1.941 g/cm³ y 1.932 g/cm³, ya que el exceso de ceniza, al ser un material liviano, genera más vacíos y absorbe parte de la humedad destinada a lubricar las partículas del suelo, lo que dificulta la compactación y reduce la MDS. Por ello, se identifica que el contenido óptimo se encuentra alrededor del 6%, donde se logra la mejor combinación entre densificación y estabilidad del suelo, mientras que mayores porcentajes reducen este beneficio.

Conclusión del objetivo específico 3

En correlación al CBR. Los valores obtenidos fueron 6.07%, 11.29%, 12.55%, 12.07% y 9.23% para dosificaciones de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, respectivamente. El

incremento del CBR hasta el 6% se explica principalmente por el contenido de sílice presente en la ceniza, el cual favorece reacciones con los compuestos del suelo, contribuyendo a la formación de enlaces que incrementan la cohesión y mejoran el intertrabado entre partículas. Asimismo, sus partículas finas ayudan a rellenar vacíos, generando una estructura más compacta y resistente frente a cargas. No obstante, al aumentar la dosificación a 8% y 10%, el CBR disminuye, debido a que el exceso de ceniza al ser un material liviano y con alto contenido de finos genera mayor porosidad y reduce la eficiencia de estas reacciones, afectando la resistencia del suelo. En consecuencia, se identifica que el contenido óptimo es del 6%.

VII. Recomendaciones

1. Se recomienda considerar el uso de material cenizo fibra de coco como material estabilizante en suelos arcillosos asignados a subrasantes, permitiendo incrementar la capacidad de soportar cargas tras ser añadido el aditivo cenizo, alcanzando valores que cumplen con los estándares proporcionados por el Ministerio de Transportes (MTC).
2. Se recomienda usar proporciones no mayores al 6% para suelos con características iguales o similares al obtenido, ya que en este rango se obtiene el mejor desempeño en términos de capacidad de soporte, reducción de plasticidad y mejora en la compactación, lo que lo hace adecuado para su aplicación como capa de subrasante en pavimentaciones.
3. Es recomendable emplear ceniza de fibra de coco en proyectos donde se requiera reducir la plasticidad del suelo, debido a que su adición contribuye a disminuir este parámetro, favoreciendo una mayor estabilidad y un mejor comportamiento frente a variaciones de humedad durante la ejecución y vida útil de la obra.
4. Considerando que la incorporación de ceniza de fibra de coco al suelo arcilloso aumenta ligeramente la densidad seca máxima, se sugiere combinarla con estabilizadores como cal, cemento o emulsión asfáltica, con el fin de optimizar la densidad.
5. Se sugiere controlar adecuadamente el porcentaje de ceniza de fibra de coco incorporado al suelo, debido a que, si bien mejora la compactación en proporciones moderadas, cantidades excesivas pueden generar una reducción en la densidad seca máxima. Asimismo, podría evaluarse su uso en combinación con otros estabilizantes, con la finalidad de optimizar las propiedades del suelo según las condiciones específicas del proyecto.

VIII. Referencias

- ADOT. (2005). Construction Manual. *"Arizona Department of Transportation"*, 300-307. Obtenido de https://azdot.gov/sites/default/files/construction-manual/CMchapter_3.pdf
- Afthab, O. P., Jan, N. F., Rasheed, N., & Sreeja, V. (2024). *"Optimización de la ceniza de cáscara de coco para mejorar la resistencia"*. India. doi:<https://doi.org/10.7770/safer-V12N-art785>
- Arias, F. G. (2006). *"El proyecto de investigación introducción a la metodología científica"*. Caracas: Episteme, C.A. Obtenido de <https://abacoenred.org/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigaci%C3%B3n-F.G.-Arias-2012-pdf-1.pdf>
- Arimanwa, M. C., Anyadiegwu, P. C., & Ogbonna, N. (2020). *"El posible uso de ceniza de fibra de coco (CFA) en concreto"*. Nigeria: The International Journal of Engineering and Science. Obtenido de <https://www.theijes.com/papers/vol9-issue1/Series-2/G0901026875.pdf>
- Bañón, B. L., & Beviá, G. J. (2000). *Manual de carreteras*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=189942>
- Bautista, F., & Aguilera, A. (2023). *"Propiedades del suelo y procesos"*. México: Ciudad Universitaria UNAM. Obtenido de https://www.smcsmx.org/files/2023/LIBRO_2_2023.pdf
- Borja, S. M. (2016). *"Metodología de Investigación Científica para ingeniería Civil"*. Lima: Universidad Continental. Obtenido de https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil

- Buendía, E. L., Colás, B. M., & Hernández, P. F. (2006). *"Métodos de investigación en psicopedagogía"*. Madrid. Obtenido de https://www.academia.edu/115313718/M%C3%A9todos_de_Investigaci%C3%B3n_en_Psicopedagog%C3%ADa_Leonor_Buend%C3%ADa_E_Pilar_Col%C3%A1s_B_Fuensanta_Hern%C3%A1nez_P
- Buitrago, G. V. (2022). *"Revisión de literatura sobre el uso de asfalto flexible reciclado (RAP) como alternativa para la pavimentación de vías terciarias y el efecto económico en la construcción y mantenimiento de la vía"*. Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia. Obtenido de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/a5debc15-702e-4854-aaa7-d5d73d40e734/content>
- Caltrans. (2021). "Departamento de Transporte de California". *Geotechnical Manual - Soil Correlations*. Obtenido de <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/geotechnical-services/202103-gm-soilcorrelations-a11y.pdf>
- Caltrans. (2022). "Departamento de Transporte de California". *Highway Design Manual*, 660-666. Obtenido de <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/design/documents/chp0660-a11y.pdf>
- Cauna, T. I., & Corasi, A. B. (2023). *"Influencia del polvillo de cloruro de magnesio en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante, carretera nueva Samegua, Moquegua – 2023"*. Lima. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_573c6e8e75220d83036fdd85a8d82f84
- Chirinos, Ñ. E., Rodríguez, L. E., & Muñoz, P. S. (2021). "Métodos de estabilización de suelos arcillosos para mejorar el CBR con fines de pavimentación: una revisión literaria". *Artículo de investigación científica*. doi:10.47864/SE(51)2021p77-92_129

- Das, B. M. (2001). *"Fundamentos de Ingeniería geotécnica"*. Mexico: RPK. Obtenido de <https://www.geologiaviva.info/wp-content/uploads/2022/01/fundamentos-de-ingenieria-geotecnica-BMD.pdf>
- DOT. (2004). "Department of Transportation". *Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications*, 68. Obtenido de <https://highways.dot.gov/publications/public-roads/summer-2004/scrap-tires-roadways>
- Duque, E. G., & Escobar, P. C. (2002). *"Clasificación de suelos"*. Manizales. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3375>
- González, M., & Pérez, M. (2023). "Análisis de las propiedades mecánicas de un suelo expansivo para la autoconstrucción de una vivienda de interés social". *ALCONPAT*, 13(3), 312-327. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.660>
- Guzmán, R. I., & Rodríguez, C. M. (2021). *"Mejoramiento de la subrasante empleando la ceniza de cáscara de coco en el distrito de Perené, Junín 2021"*. Lima: Universidad César Vallejo. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/73296/Guzm%c3%a1n_RIS-Rodr%c3%adguez_CMA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Harrington, J. (2005). "Use of recycled materials like scrap tires in highway applications". *Federal Highway Administration*. Obtenido de <https://highways.dot.gov/public-roads/januaryfebruary-2005/recycled-roadways>
- Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista, L. M. (2014). *"Metodología de la Investigación"*. México: Mc Graw Hill. Obtenido de <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Hinostroza, A. M. (2020). *"Mejoramiento de la subrasante utilizando ceniza de fibra de coco en la Avenida 13 de Julio de Manchay, Pachacamac, Lima - 2019"*. Lima:

- Universidad César Vallejo. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/48818/Hinostroza_AM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ikeagwuani, C. C., & Nwonu, D. C. (2023). *"Análisis de estabilidad y predicción de suelos expansivos modificados con ceniza de cáscara de coco como material de terraplén de carreteras"*. Nigeria. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s40515-021-00215-1>
- INDOT. (2019). "Indiana Department of Transportation". *Manual de diseño geotécnico de Indiana*, 1-19. Obtenido de https://www.in.gov/indot/engineering/files/geotech_design_manual_ch05-lab_testing.pdf
- Jagwani, D., & Jaiswal, A. (2019). *"Estabilización de suelos expansivos con ceniza de cáscara de coco"*. India. Obtenido de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3353634
- Kumar, S., & Sharma, E. A. (2022). *"Estabilización química de suelos arcillosos utilizando una mezcla de residuos de carburo de calcio y ceniza de cáscara de coco"*. India: International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Obtenido de <https://www.irjet.net/archives/V9/i9/IRJET-V9I910.pdf>
- López, G. P., Reyes, G. D., Moreno, V. O., Cordero, M. M., & Escobar, G. J. (2023). "Evaluación del mejoramiento de suelos arcillosos empleando cemento base pumicita en la localidad de Dos Arroyos, Juchique de Ferrer". *Ciencia Latina*, Vol. 7 Núm. 6 . doi:https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.9372
- Martínez, B. C. (2012). *"Estadística y muestreo"*. Bogotá. Obtenido de https://www.academia.edu/39626329/Estad%C3%ADstica_y_muestreo_Ciro_Mart%C3%ADnez_Bencardino_13ED

- Melquiades, E. J. (2022). *"Estabilización de suelos de fundación arcillosa con extracto de Schinu Molle para subrasante, km 26+800 carretera Huánuco – Punto Unión, 2021"*. Huanuco: Universidad Nacional "Hermilio Valdizán". Obtenido de <https://repositorio.unheval.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13080/7758/TIC00308E88.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Monteza, R. F. (2021). *"Estabilización de la subrasante con el uso de cenizas de cáscara de coco en la calle Juan Velasco, Carabayllo - 2021"*. Lima: Universidad César Vallejo. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/82797>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2010). *Norma técnica CE.010: Pavimentos urbanos*. <https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos Urbanos.pdf>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras: Diseño geométrico* (DG-2014). http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3580.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos*. https://drive.google.com/file/d/1p9kERBPq09HX-a5nb_EbY_sMKq_paKDM/view
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial* (R.M. N.º 660-2008-MTC/02). http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_1556.pdf
- M Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. https://drive.google.com/file/d/1Am1jUdFkZerWNuzyX8CxIjoBghSde6d_/view
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4980603/Glosario%20de%20T%C3>

[%A9rminos%20de%20Uso%20Frecuente%20en%20los%20Proyectos%20de%20Infraestructura%20Val.pdf](#)

Instituto Nacional de Calidad. (2019). *NTP 339.129: Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos*.
<https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>

Instituto Nacional de Calidad. (2019). *NTP 339.145: Método de ensayo de CBR (relación de soporte de California)*. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>

Núñez, B. Y. (2024). *"Estudio experimental del uso de la ceniza de cascarilla de Oryza Sativa y fibra de coco en la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante"*. Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Obtenido de <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/7917>

Pimienta, P. J., & Orden, H. A. (2017). *"Metodología de la investigación"*. México: Pearson. Obtenido de <http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/handle/54000/1268>

Ramírez, A. A., Guanuchi, O. L., Cahuana, T. R., Vera, T. R., & Holgado, T. J. (2023). *"Métodos de investigación científica"*. Perú: INUDI-PERÚ. doi:10.35622/inudi.b.094

Rezabala, D. M., & Ortiz, H. E. (2023). *"Propuesta de estabilización con cal y cemento para subrasante con presencia de suelos arcillosos ubicada en la vía Tosagua-Chone sector bachillero"*. Ecuador: Ciencias de la Educación. doi:10.23857/dc.v9i3.3518

Rimachi, P. I., & Sánchez, R. R. (2019). *"Estabilización de suelos con adición de ceniza de cáscara de coco al 0.5%, 1.5%, 3%, 5% y 8%, a nivel de subrasante en el sector de Lampanin Distrito de Cáceres del Perú Provincia del Santa, Ancash – 2019"*. Ancash: Universidad César Vallejo. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/40233>

- Rojas, L. C., Hernández, A. M., & Escalaya, A. M. (2024). "Uso del ensayo penetrómetro de cono en la determinación de la resistencia alcorte no drenado de suelos arcillosos blandos de la región San Martín, Perú". *Perfiles de Ingeniería*. doi:<https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v20i21.6589>
- Salazar Gutiérrez, E. (2018). Geología Aplicada al Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Abancay-Apurímac. Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/3487>
- Salvador, J. H. (2014). "*Manual de procedimientos analíticos para suelos y agregados de construcción*". Piura: Universidad de Piura. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/404e5a16-d9f5-40c6-88fd-339d92c1b1d6/content>
- Vargas, C. Z. (2009). "*La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica*". Costa Rica: Revista Educación. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/440/44015082010.pdf>
- Wimalasena, K., & Gallage, C. (2022). "Predicting California Bearing Ratio (CBR) Value of a Selected Subgrade Material". *Road and Airfield Pavement Technology*, 547-558. Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-87379-0_41
- WSDOT. (2013). "Washington State Department of Transportation". *Soil and Rock Classification and Logging*. Obtenido de <https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M46-03/Chapter4.pdf>
- WSDOT. (2013). "Washington State Department of Transportation". *Engineering Properties of Soil and Rock*, 5-46. Obtenido de <https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M46-03/Chapter5.pdf>

Yusuf, I. T., & Zava, A. E. (2019). *"Investigación sobre la idoneidad de la ceniza de cáscara de coco como estabilizador de suelos para carreteras"*. Nigeria. Obtenido de <https://ijtech.eng.ui.ac.id/article/view/882>

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes