



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Facultad de Ingeniería Civil
Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Análisis del uso de ceniza de cascarilla de arroz en la estabilización de la subrasante en la trocha carrozable Huanja-Jangas-Huaraz-Ancash-2023

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autores

Jerikson Lucio Obregon Vega
Cristhian Antony Varillas Mendoza

Asesor

M(o). Christian Benavente Leon




CHRISTIAN BENAVENTE LEON
INGENIERO CIVIL
Reg. C.I.P. Nº 179838

Huacho – Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

INFORMACIÓN

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Jerikson Lucio Obregon Vega	70414794	19/12/2025
Cristhian Antony Varillas Mendoza	71350641	19/12/2025
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Christhian Benavente Leon	72228127	https://orcid.org/0000-0003-2416-4301
DATOS DE LOS MIEMROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Juan Orlando Chuquilin Arbildo	33577662	https://orcid.org/0000-0002-0551-5498
Pablo Wenceslao Velasquez Guardia	07549627	https://orcid.org/0000-0002-4632-2000
Carlos Orlando Claros Vasquez	15648641	https://orcid.org/0000-0003-3566-8003

Jerikson Lucio Obregon Vega-exp 2025-078805 Cris...

ANÁLISIS DEL USO DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ EN LA ESTABILIZACION DE LA SUBRASANTE EN LA TROCHA CA...

- Quick Submit
- Quick Submit
- Facultad de Ingeniería Civil

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3402014303

Fecha de entrega

7 nov 2025, 9:49 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

7 nov 2025, 9:58 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

BORRADOR_DE_TESIS_OBREGON_VEGA_y_VARILLAS_MENDOZA.docx

Tamaño del archivo

5.0 MB

92 páginas

14.698 palabras

81.137 caracteres



Página 2 de 99 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3402014303

20% 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

- 17% Fuentes de Internet
- 4% Publicaciones
- 16% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían 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.

Dedicatoria

La presente tesis se la dedicamos de manera muy especial a nuestros padres por brindarnos todo su apoyo a lo largo de todos estos años y por enseñarnos a vencer cualquier obstáculo con paciencia y perseverancia.

Agradecimiento

Agradecemos a nuestros padres, por ser un pilar fundamental frente a las adversidades.

Agradecemos a la Universidad Jose Faustino Sanchez Carrion y a nuestro asesor Mg. Benavente Leon Christian por guiarnos durante el desarrollo de la investigación.

índice

Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Índice de tablas	viii
Resumen	x
Abstract.....	xi
Introducción.....	12
Capítulo I: Planteamiento del Problema.....	13
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	13
1.2. Formulación del Problema.....	15
1.2.1. Problema general.....	15
1.2.2. Problemas específicos.....	15
1.3. Objetivos de la investigación.....	15
1.3.1. Objetivo general:.....	15
1.3.2. Objetivos específicos:.....	16
1.4. Justificación de la investigación.....	16
1.5. Delimitación de la investigación.....	17
Capítulo II: Marco Teórico.....	19
2.1. Antecedentes de la investigación.....	19
2.1.1. Investigaciones internacionales.....	19
2.1.2. Investigaciones nacionales.....	23
2.2. Bases teóricas.....	27
2.3. Bases filosóficas.....	37
2.4. Definición de Términos Básicos.....	38
2.5. Hipótesis de Investigación.....	44

2.5.1.	Hipótesis General	44
2.5.2.	Hipótesis Específicas	44
2.6.	Operacionalización de variables	45
Capítulo III: Metodología		49
3.1.	Diseño metodológico	49
3.2.	Población y muestra	50
3.2.1.	Población	50
3.2.2.	Muestra	50
3.3.	Técnicas de recolección de datos:	51
3.4.	Técnicas para el procesamiento de información:	52
Capítulo IV: Resultados		53
4.1.	Análisis de Resultados	53
Capítulo V: Discusión		67
5.1.	Discusión de Resultados	67
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones		70
6.1.	Conclusiones	70
6.2.	Recomendaciones	72
Capítulo VII: Referencias		74
	Fuentes Documentales	74
	Fuentes bibliográficas	74
	Fuentes Electronicas	77
Anexos		78

Índice de tablas

Tabla 1 : Operacionalización de las variables.	46
Tabla 2 : Espécimen, CBR y parcial para la recolección de datos.	51
Tabla 3 : Técnica e instrumento para la recolección de datos.	51
Tabla 4 : Estadística descriptiva de los límites de Atterberg.	53
Tabla 5 : Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.	56
Tabla 6 : Resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene.	56
Tabla 7 : Resultados del análisis de varianza (ANOVA).	57
Tabla 8 : Estadística descriptiva de proctor modificado.	57
Tabla 9 : Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.	59
Tabla 10 : Resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene.	60
Tabla 11 : Resultados del análisis de varianza (ANOVA).	61
Tabla 12 : Estadísticas descriptivas CBR 100%.	61
Tabla 13 : Estadísticas descriptivas CBR 95%.	62
Tabla 14 : Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.	64
Tabla 15 : Resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene.	65
Tabla 16 : Resultados del análisis de varianza (ANOVA).	66

Índice de Figuras

Figura 1 : Equipo para ensayos de California Bearing Ratio en campo.	32
Figura 2 : El ensayo de Proctor Modificado aplica 4.5 veces el esfuerzo de compactación del ensayo de Proctor Estándar.	36
Figura 3 : Límites de atterberg por porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz.	54
Figura 4 : Tendencia de los límites de Atterberg.	55
Figura 5 : Densidad y humedad por porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz.....	58
Figura 6 : Distribución de densidad y humedad.....	58
Figura 7 : Tendencia de densidad y humedad.	59
Figura 8 : Distribución de California Bearing Ratio 100% por porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz.	62
Figura 9 : Distribución de California Bearing Ratio 95% por porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz.	63
Figura 10 : Comparación de California Bearing Ratio 100% y 95%.....	64

Resumen

La investigación evalúa la influencia de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) en las propiedades geotécnicas de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja, Jangas, Huaraz, Ancash. El estudio se centró en analizar el efecto de la adición de CCA en proporciones de 2%, 4% y 6% sobre los límites de consistencia, densidad y capacidad de soporte del suelo.

Los resultados mostraron cambios significativos en las propiedades del suelo. Los límites de Atterberg evidenciaron una reducción del límite líquido de 30.06% a 27.45% y del límite plástico de 21.32% a 16.90% con 6% de CCA. La densidad seca máxima aumentó de 1.82 g/cm³ a 1.93 g/cm³ con 2% de CCA, mientras que el contenido de humedad óptimo se incrementó progresivamente de 9.08% a 11.77%. La capacidad de soporte mostró mejoras sustanciales, con un aumento del CBR al 100% de 11.74% a 15.47%, y al 95% de 7.22% a 12.17% con 6% de CCA.

La investigación concluye que la adición de CCA es efectiva para mejorar las propiedades geotécnicas de la subrasante, con un porcentaje óptimo alrededor del 2%, donde se observaron los cambios más significativos. Esta solución no solo mejora el desempeño técnico de la trocha carrozable, sino que también representa una alternativa sostenible al utilizar un residuo agroindustrial. Los resultados sugieren que esta estabilización puede incrementar significativamente la vida útil y el desempeño de la infraestructura vial.

Palabras claves: CBR, ceniza de arroz, compactación.

Abstract

The research evaluates the influence of rice husk ash (RCA) on the geotechnical properties of the subgrade in the Huanja-Jangas dirt road, Huaraz, Ancash. The study focused on analyzing the effect of the addition of CCA in proportions of 2%, 4% and 6% on the limits of consistency, density and bearing capacity of the soil.

The results showed significant changes in soil properties. The Atterberg limits evidenced a reduction of the liquid limit from 30.06% to 27.45% and of the plastic limit from 21.32% to 16.90% with 6% CCA. The maximum dry density increased from 1.82 g/cm³ to 1.93 g/cm³ with 2% CCA, while the optimum moisture content increased progressively from 9.08% to 11.77%. Bearing capacity showed substantial improvements, with an increase in CBR at 100% from 11.74% to 15.47%, and at 95% from 7.22% to 12.17% with 6% CCA.

The research concludes that the addition of CCA is effective in improving the geotechnical properties of the subgrade, with an optimum percentage around 2%, where the most significant changes were observed. This solution not only improves the technical performance of the carriageway, but also represents a sustainable alternative by using an agro-industrial waste. The results suggest that this stabilization can significantly increase the useful life and performance of the road infrastructure.

Key words: CBR, rice ash, compaction.

Introducción

La infraestructura vial, particularmente en zonas rurales del Perú como el centro poblado de Huanja, enfrenta desafíos significativos en términos de estabilidad y durabilidad. La presente investigación aborda la problemática de los suelos arcillosos de baja plasticidad utilizados como subrasante en trochas carrozables, explorando una solución innovadora y sostenible mediante la adición de ceniza de cascarilla de arroz (CCA). En América Latina, a pesar de contar con más de tres millones de kilómetros de infraestructura vial, la densidad de vías pavimentadas es significativamente inferior a otras regiones desarrolladas (Chauvet y Albertone, 2020). Esta situación es particularmente crítica en áreas rurales donde las trochas carrozables son frecuentemente la única opción de transporte (López, 2021). En el caso específico de Huanja, estas vías no pavimentadas enfrentan problemas de estabilidad y mantenimiento que afectan directamente la accesibilidad a servicios básicos, la productividad agrícola y el desarrollo socioeconómico de la comunidad.

La investigación se centra en evaluar cómo la adición de CCA en proporciones de 2%, 4% y 6% puede mejorar las propiedades geotécnicas del suelo de la subrasante. Este enfoque no solo busca mejorar la capacidad portante y estabilidad del suelo, sino también proponer una solución económica y ambientalmente sostenible al utilizar un subproducto agroindustrial (Carrasco, 2022). El estudio emplea una metodología experimental rigurosa, incluyendo ensayos de límites de consistencia, Proctor y CBR, realizados en muestras extraídas de la trocha carrozable de Huanja. Los resultados de esta investigación tienen el potencial de proporcionar una solución práctica y efectiva para mejorar la infraestructura vial rural, contribuyendo así al desarrollo sostenible de las comunidades locales y estableciendo un precedente para futuras aplicaciones en contextos similares.

Capítulo I: Planteamiento del Problema

1.1. Descripción de la realidad problemática

Las redes de carreteras y caminos constituyen un pilar esencial para el desarrollo económico de cualquier país, generando múltiples ventajas tanto en el ámbito económico como social (Chauvet y Albertone, 2020). Para mantener y potenciar estas ventajas, resulta crucial implementar estrategias efectivas de mantenimiento vial. Los dirigentes y autoridades deben reconocer el valor estratégico del mantenimiento de carreteras, destinando recursos suficientes y aplicando una gestión eficiente que permita optimizar el rendimiento de toda la red vial. Cuando no se destinan los recursos necesarios o se administra de forma deficiente el sistema de carreteras, las repercusiones negativas pueden afectar significativamente tanto la economía como el bienestar de la población (Chayña, 2022).

Según lo señalado por Roa (2022), la región latinoamericana cuenta con una extensa red de carreteras que supera los tres millones de kilómetros, repartidos a lo largo de sus 18,5 millones de km² de territorio. Sin embargo, esta cifra contrasta con la realidad de que la densidad de vías pavimentadas permanece considerablemente baja, presentando similitudes con el continente africano. Esta situación resulta preocupante al compararla con otras regiones: la densidad vial es 42 veces menor que la europea y representa apenas una décima parte de la que existe en Estados Unidos. Por otra parte, Quispe (2020) destaca que, más allá de desarrollar nuevos proyectos de infraestructura vial, resulta esencial priorizar el cuidado y preservación de las vías ya construidas, especialmente considerando que Latinoamérica enfrenta un déficit significativo en su sistema de carreteras.

En muchas áreas rurales de Perú, las trochas carrozables, son la única opción de transporte, lo que significa que las comunidades y centros poblados como Huanja, a menudo tienen acceso limitado a servicios básicos como atención médica, educación y suministros de alimentos debido a la mala accesibilidad de estos caminos. Según (Quinte, 2022) a menudo no reciben el mantenimiento adecuado debido a la falta de fondos o recursos, lo que puede provocar el deterioro de la infraestructura vial y aumentar el riesgo de accidentes de tráfico, incluso pueden limitar la productividad agrícola al dificultar el transporte de los productos a los mercados, lo que puede afectar negativamente los ingresos y el sustento de los pobladores del centro poblado de Huanja. (Hernandez y Perez, 2022) mencionan que finalmente, las trochas carrozables pueden ser inseguras debido a la falta de señalización adecuada, la falta de iluminación y la falta de medidas de seguridad, lo que puede aumentar el riesgo de accidentes de tráfico. En nuestro país, no reciben la atención adecuada del gobierno en términos de inversión y mantenimiento, lo que puede agravar los problemas existentes y dificultar aún más el acceso y la movilidad de las comunidades.

En general, la problemática de la trocha carrozable del centro poblado de Huanja, distrito de Jangas, está relacionada con la falta de inversión, mantenimiento y atención de la municipalidad y del gobierno de turno, lo que puede tener consecuencias negativas en la accesibilidad, la seguridad y la productividad de las comunidades rurales. Se necesita una solución innovadora para mejorar la calidad de vida de los pobladores del centro poblado.

Este estudio evaluará la factibilidad de incorporar ceniza obtenida de la cáscara de arroz (CCA) como material estabilizador del suelo de fundación en el camino rural que atraviesa el centro poblado de Huanja, ubicado en el distrito de Jangas, provincia de Huaraz. La implementación de esta alternativa busca generar mejoras sustanciales en las condiciones de circulación tanto para los residentes de la zona como para los vehículos que

utilizan esta vía del centro poblado. De este modo, se pretende abordar la problemática existente mediante una solución costo-efectiva que responda adecuadamente a las demandas y requerimientos de la comunidad local.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema general.

¿Qué efecto tiene la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023?

1.2.2. Problemas específicos.

¿Cómo incide la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en los límites de consistencia de atterberg de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023?

¿Cómo incide la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en su ensayo de proctor modificado de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023?

¿Cómo incide la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en el análisis de capacidad de soporte de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general:

Determinar qué efecto tiene la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

1.3.2. Objetivos específicos:

Determinar la incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en los límites de consistencia de atterberg de la en la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

Determinar la incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en el ensayo de proctor modificado de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

Determinar la incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en el análisis de la capacidad de soporte de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

1.4. Justificación de la investigación

Justificación Teórica: El conocimiento que se ha obtenido de esta investigación permite ampliar nuestra comprensión sobre cómo mejorar la estabilidad del suelo que se utiliza como subrasante en caminos rurales y trochas carrozables, lo que tendrá un impacto positivo en la transición de los vehículos que circulan por esta vía. Es importante conocer los efectos positivos de la ceniza de cascarilla de arroz en la subrasante a través de diferentes ensayos físicos y mecánicos para ofrecer una solución a los problemas que enfrenta la población del centro poblado de Huanja. Esta investigación proporciono información sobre la posible mejora en

la trocha carrozable de Huanja-Jangas, y es importante destacar que no existen investigaciones previas en la zona sobre este tema.

Justificación Técnica: La investigación en la cual se usó la CCA en la subrasante de la trocha carrozable de Huanja-Jangas, apoyado en investigaciones internacionales previas donde se empleó la CCA del para el mejoramiento de la estabilidad de subrasantes, en los cuáles se obtuvieron resultados positivos en su aplicación. En este caso se procedió con la CCA, con lo cual hubo resultados significativos favorables para brindar una solución a la problemática presentada.

Justificación Económica: En este caso hubo resultados significativos favorables de la investigación en la cual se usó la CCA en la subrasante, se demostrará que la propuesta tiene una importancia económica, ya que, generará beneficios para los pobladores, generará una mayor comodidad para el tránsito de la trocha carrozable lo cual influenciará directamente en el incremento de vehículos que circulen por esta vía, posible mejora de la productividad, entre otros aspectos.

Justificación Social: El análisis realizado ofreció una solución para los múltiples problemas que presenta la sociedad colectiva presente en el centro poblado Huanja en cuanto al uso de la trocha carrozable, mejorando la movilización de los pobladores, generando un posible incremento en el parque automotor el cual ayudará a mejorar la economía local y reducirá el riesgo de accidentes en la zona.

1.5. Delimitación de la investigación

La delimitación espacial: La presente investigación se desarrolló en el camino rural de Huanja, ubicado en la provincia de Huaraz, correspondiente al

departamento de Ancash, estableciendo este sector vial como el área geográfica específica de estudio.

La delimitación temporal: El proceso de desarrollo de esta investigación se ejecutó durante el intervalo temporal comprendido entre el 1 de abril de 2023 y el 10 de octubre de 2023, abarcando un período de aproximadamente seis meses para la realización de las actividades programadas.

Viabilidad del estudio

Viabilidad financiera: La investigación contó con la financiación propia de los investigadores a cargo. Así mismo los estudios constan de una toma única de muestra lo cual implica una sola visita de campo y reduce los gastos en movilización de personal y equipos, ya que dichas muestras se trabajaron en laboratorios apropiados para los ensayos correspondientes.

Viabilidad técnica: Para la presente investigación se contó con mucha bibliografía a partir de múltiples estudios realizados en otras universidades, además se contó con una facilidad de obtención de datos al ser posible la toma de muestras en un tiempo reducido lo cual implica una sola o reducidas salidas al campo, finalmente en cuanto al personal necesario para la extracción de las muestras será suficiente la mano de obra de los tesistas.

Viabilidad operativa: El área de investigación se situó en una proximidad considerable a la ciudad de Huaraz, lo cual posibilitó una accesibilidad sencilla para el equipo de trabajo, traslado de herramientas, captación de datos y recolección de información.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Investigaciones internacionales

Loaiza et al (2020) de la Universidad Cooperativa de Colombia en su tesis titulada: “Mejoramiento de subrasante con ceniza de bagazo de caña de la vía el Totumo - Colombia” con la finalidad de examinar la aplicación de este material para la subrasante; a través de una metodología de aproximación cuantitativa, diseño experimental y alcance explicativo, ejecutaron la identificación del trazado, extracción de especímenes, ensayos de compresión estándar AASHTO y CBR. Como resultado principal se identificó que los desechos calcinados provenientes del bagazo de caña, al formar una ceniza, constituyen un material de gran volumen y difícil compactación, lo que provoca que sus componentes tiendan a separarse al mezclarse con otros elementos. Esta característica hace que la unión entre partículas aporte mayor solidez, ya que un material con mayor densidad no necesariamente implica mayor resistencia estructural. Se estableció que el bagazo de caña genera efectos positivos en el fortalecimiento de suelos de cimentación en terrenos con características limo-arcillosas. Adicionalmente, mejora el CBR y reduce la expansión del terreno, contribuyendo de esta manera a la estabilización de la subrasante y proporcionando beneficios.

Andaluz (2022) de la Universidad Técnica de Ambato, en su tesis titulada: “Estudio del efecto de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades físico-mecánicas en suelos finos de subrasante - Ecuador” con la finalidad de determinar el efecto que puede generar los residuos CCA en las características físico-

mecánicas de los terrenos finos de subrasante; empleó como población terrenos de tres ubicaciones distintas del cantón Puyo; mediante un enfoque metodológico de carácter experimental con alcance descriptivo-explicativo y perspectiva cuantitativa, se llevaron a cabo ensayos de campo como excavaciones superficiales y medición de densidad in situ, análisis granulométrico, peso específico, proctor modificado y resistencia CBR. Estos últimos ensayos de suelo mezcladas con CCA en porcentajes de 0%, 1%, 3%, 5% y 8%. Los resultados evidenciaron que al aumentar progresivamente los desechos incinerados de cascarilla de arroz desde 0% hasta 8%, la resistencia al soporte CBR analizadas experimentó incrementos significativos: en la zona de Santa Isabel varió del 7.80% al 12.10%, en la zona de Fátima del 8.60% al 13.20%, mientras que en la zona de Veracruz osciló del 8.40% al 13.50%. Se concluyó que la aplicación de CCA como agente estabilizador del suelo de cimentación produjo un aumento considerable en los valores de CBR de todas las muestras evaluadas.

Barragán y Cuervo (2019) En su proyecto de tesis titulada: “Análisis del comportamiento físico mecánico de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% de la variedad a un suelo areno – arcilloso – Colombia” con la finalidad de examinar un terreno con las características de areno arcilloso al incorporarse residuos CCA con respecto a un suelo natural; investigaron la arcilla obtenida en el municipio de Agua de Dios; a través de una metodología de diseño experimental, alcance descriptivo mixto y con una aproximación cuantitativa-cualitativa, ejecutaron las pruebas de granulometría del terreno natural mediante tamizado, límites de plasticidad, ensayo de Proctor modificado y evaluación de la capacidad portante (CBR). Como resultado se realizó la adición del 1% de CCA (ceniza de cascarilla de arroz) en suelos areno-arcillosos genera un efecto en el

aumento de su resistencia, sin embargo, este incremento no resulta suficiente para alcanzar una mejora sustancial tomando en cuenta el valor de CBR de la subrasante no requiere intervención ni estabilización. Esto se debe a que el CBR de la muestra con 1% de CCA alcanzó 1,9 en comparación con la muestra sin tratar que registró 1,6, representando únicamente un incremento del 19%. Se estableció que el uso de las CCA provenientes de este subproducto agroindustrial como material estabilizador para suelos con problemas de estabilidad presenta ventajas económicas considerables al abordar esta problemática en proyectos de infraestructura de transporte, especialmente cuando se compara con las técnicas convencionales de estabilización de suelos.

Galindo et al (2019) de la Universidad Cooperativa de Colombia en su tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil titulada: “Evaluación de las propiedades físico – mecánicas de la subrasante de la cantera la caima, estabilizada con ceniza de bagazo de caña de azúcar y cemento hidráulico - Colombia” con la finalidad de establecer la factibilidad de sustituir parcialmente el cemento por residuos calcinados de bagazo de caña de azúcar (CBCA); investigaron el material de suelo extraído de 40 km de distancia de la ciudad de Ibagué; a través de una metodología de aproximación cuantitativa, diseño experimental y alcance explicativo, sometieron distintos especímenes a evaluaciones de compresión no confinada, CBR. Se evaluaron las características del suelo natural mediante su combinación con proporciones de 3%, 5% y 7% de cemento, el cual fue posteriormente sustituido por CBCA equivalentes al 25%, 50% y 75%., obteniendo como resultado revelaron una de la resistencia en las propiedades de la mezcla suelo y cemento cuando se efectuó la sustitución del cemento por CBCA, particularmente en los valores de CBR. No obstante, al

establecer la comparación con el suelo natural, las características del material tratado sí experimentaron mejoras considerables. Se concluyó que resulta técnicamente viable la implementación de CBCA en la estabilización de subrasante, aunque debe considerarse el proceso de deterioro que manifestaron los especímenes durante los ensayos de humedecimiento y secado. Esta observación sugiere la necesidad de evaluar cuidadosamente las condiciones de exposición ambiental en la aplicación práctica de este tipo de estabilización.

Hernández y Pérez (2021) de la Universidad Santo Tomás en su tesis para título de magíster en infraestructura vial titulada: “Evaluación del comportamiento de terreno natural con adiciones de escoria de acería de gerdaudiac como capa de mejoramiento de la sub-rasante en el suelo de Nemocón - Colombia” con la finalidad de examinar la incorporación de escoria de acería, en el suelo de Nemocón; investigaron el terreno natural en el municipio de Nemocón; a través de una metodología de diseño experimental, alcance exploratorio - descriptivo y con una aproximación cuantitativa. Los hallazgos evidenciaron que, logró determinar que la subrasante tratada con incorporación de escoria de acería presenta una optimización notable tanto en sus propiedades físicas como químicas. Esta mejora se manifestó mediante la transición del valor de CBR desde un 16.2% inicial hasta alcanzar un 34.3% posterior al tratamiento. Los resultados permiten establecer que la escoria de acería contribuye efectivamente al mejoramiento de la subrasante, proporcionando un incremento sustancial en su capacidad portante y comportamiento geotécnico general.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Valdivia y Quijano (2021) de la Universidad Cesar Vallejo en su tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil titulada: “Estabilización de subrasante adicionando ceniza de carbón y tusa de maíz en trocha carrozable Lomaspata - Coracora, distrito Coracora, Ayacucho – 2021” con la finalidad de obtener resultados favorables respecto al mejoramiento del CBR al emplear estos estabilizadores y también aprovecharlos para futuros proyectos de optimización del CBR, investigaron localizada en el distrito de Coracora, Ayacucho; a través de una metodología de aproximación cuantitativa, diseño experimental y alcance explicativo, recolectaron especímenes de la subrasante con la incorporación de la ceniza de carbón (CC) y tusa de maíz (TM) a las cuales ejecutaron pruebas de: granulometría, la cual estableció el tipo de terreno y dicho material se empleó para realizar los límites de atterberg; ensayo de proctor, el cual estableció el OCH y la MDS; y la prueba de CBR, la cual determinó el porcentaje del CBR; elaborando una comparativa posterior a las evaluaciones. Los resultados obtenidos demostraron que los residuos calcinados de carbón y la tusa de maíz generan una optimización en las características de plasticidad de la subrasante. Mediante la aplicación del ensayo proctor modificado se estableció que la incorporación de CC y TM produce mejoras significativas en los parámetros de compactación. En condiciones naturales se registró un OCH de 21.60% y una MDS de 1.600 grs/cm³, mientras que al incorporar ceniza de carbón al 25% se obtuvieron valores de OCH de 18.20% y MDS de 1.630 grs/cm³. De manera similar, la ceniza de tusa de maíz proporcionó un OCH de 17.20% y MDS de 1.641 grs/cm³. Los ensayos de CBR ejecutados sobre el espécimen de suelo arcilloso de alta plasticidad (M-01) revelaron un valor en estado natural de 7.5%. La incorporación del 25% de ceniza

de carbón incrementó el CBR hasta 8.2%, en tanto que la adición del 25% de tusa de maíz alcanzó un valor de 9.10%. Estos resultados evidencian que ambos materiales optimizan el CBR, aunque la ceniza de tusa de maíz demuestra mayor eficiencia al generar incrementos superiores. Se concluyó que los residuos calcinados de tusa de maíz presentan un comportamiento superior comparado con la ceniza de carbón en procesos de estabilización de suelos CH (arcillas de alta plasticidad).

López (2021) de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas en su tesis titulada: “Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba – departamento de San Martín”, con la finalidad de establecer la influencia de la incorporación de residuos CCA como estabilizante del terreno arcilloso a nivel de subrasante; empleó como objeto de estudio los terrenos extraídos por una excavación en el norte de Habana; a través de una metodología de aproximación cuantitativa, diseño experimental y alcance explicativo, se realizaron ensayos que incluyeron análisis granulométrico, determinación de límites de Atterberg, Proctor y CBR, empleando proporciones de CCA correspondientes al 5%, 10% y 15% del peso del suelo. Los resultados del ensayo de CBR evidenciaron que la resistencia al 95% de la MDS del suelo natural alcanzó un valor de 3,96%. Al incorporar 5% de CCA, la resistencia se incrementó hasta 6,90%, mientras que con la adición del 10% de CCA se obtuvo un valor de 9,60%. Finalmente, la incorporación del 15% de CCA proporcionó una resistencia de 10,5%, demostrando una tendencia progresiva de mejora en la capacidad portante del material con el aumento del contenido de ceniza. Determinando que el uso de

residuos CCA como material estabilizante de terrenos arcillosos proporciona resultados favorables.

Cristobal y Quinte (2022) de la Universidad Continental en su tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil titulada: “Estabilización de subrasante con cenizas de eucalipto, paraje turístico piedra parada, Concepción, junín 2021”, con la finalidad de establecer la variación de la estabilización de la subrasante con la incorporación de residuos calcinados de eucalipto (CE) en Junín; emplearon como población del estudio la subrasante; una metodología de tipo aplicada, de alcance explicativo y diseño experimental. Los hallazgos obtenidos evidenciaron que el suelo tratado con la incorporación del 10% de CE experimentó un incremento en la MDS del 10.45%, mientras que el índice de plasticidad registró una reducción del 54.97%. Paralelamente, se observó un aumento significativo en el CBR equivalente al 385.14% y el módulo de resiliencia presentó un incremento del 157.94%. Estos resultados demuestran la efectividad del tratamiento aplicado en la modificación de las propiedades geotécnicas del material, generando mejoras sustanciales en su comportamiento mecánico y capacidad de soporte. Determinando que la estabilización de la subrasante en el terreno con la incorporación de 10 % de residuos CE incrementó la densidad máxima, el índice de plasticidad disminuyó, el CBR se incrementó y el módulo de resiliencia aumentó.

Carrasco (2022) de la Universidad Cesar Vallejo en su tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil titulada: “Estabilización de la subrasante adicionando ceniza de cáscara de arroz en diseño del pavimento rígido en pampas de hospital, 2022”, con la finalidad de establecer si la incorporación de los

residuos calcinados de CCA, influye en la estabilización de la subrasante; a través de una metodología de tipo aplicada, de alcance explicativo y diseño experimental, ejecutó pruebas para establecer las propiedades mecánicas y físicas, así como el CBR de la subrasante. Los hallazgos obtenidos demostraron que mediante la incorporación de 6% y 10% de CCA se produce un incremento en el índice de resistencia al esfuerzo cortante, optimizando el valor de CBR determinado inicialmente en campo de 5.5, cuya clasificación cualitativa del terreno correspondía a la categoría "mala". Posterior a la adición de CCA, se observó una mejora sustancial que elevó el CBR desde 5.4 hasta 9.1, modificando favorablemente su clasificación cualitativa del terreno hacia la categoría "regular". Estos resultados permiten establecer que los residuos de CCA funcionan efectivamente como agente estabilizador del suelo, logrando una mejora considerable en su capacidad portante y transformando el material en un terreno apropiado para su utilización como elemento de subrasante en proyectos de infraestructura vial.

Chayña (2022) de la Universidad Cesar Vallejo en su tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil titulada: “Análisis del uso de ceniza de totora en la estabilización de la subrasante en la trocha carrozable Ccota-Quipata, Puno, 2022”, con el propósito de analizar la inclusión de desechos incinerados de totora para el mejoramiento de suelos de cimentación en caminos rurales, utilizando porcentajes de 4%, 8%, 12% y 16%, buscando mejorar las características físicas y mecánicas del suelo de fundación. Se consideró como universo de investigación la totalidad del camino rural Ccota-Quipata, con una extensión de 2,750 Km. Mediante un enfoque metodológico cuasi-experimental de naturaleza cuantitativa, con alcance explicativo y de tipo aplicado, se realizaron diferentes ensayos

incluyendo análisis granulométrico para clasificación del suelo, determinación del contenido hídrico, límites de plasticidad, compactación para establecer la densidad máxima seca y humedad óptima, y finalmente evaluación de la resistencia al soporte. Los resultados obtenidos evidenciaron que mediante la incorporación del 16% del material se alcanzó un contenido hídrico de 17.90%, un límite líquido de 33%, límite plástico de 24% e índice plástico correspondiente al 9%. Asimismo, se registró una densidad máxima seca de 1.719 gr/cm³ con una humedad óptima de 16.55%. Los valores de CBR determinados fueron de 18.10% al 100% de la densidad máxima seca y 14.60% al 95%.

2.2. Bases teóricas

Subrasante

(Finanzas, Ministerio de Economía y, 2015) La subrasante es la capa que resulta después de nivelar y modificar la superficie del terreno mediante movimientos de tierra, ya sea cortando o rellenando. Esta capa sirve como base del pavimento o afirmado y es un componente integral que se construye entre la explanada o el terreno natural nivelado y la estructura del pavimento.

Trocha Carrozable

(MEF, 2015) estas rutas constituyen vías de tránsito que no alcanzan los parámetros geométricos requeridos para carreteras convencionales, caracterizándose por presentar un IMDA que no excede los 200 veh/día. Las calzadas requieren mínimo cuatro metros, siendo necesario construir plazoletas de cruce cada 500 m como máximo para facilitar el paso vehicular. La superficie de rodadura puede presentarse afirmada mediante materiales granulares o mantener su condición natural sin afirmar, según las condiciones del proyecto.

Estabilización de la subrasante

El Ministerio de Economía y Finanzas (2015) explica que el proceso de estabilización de subrasante busca fortalecer las características del terreno natural que forma esta capa fundamental en caminos y vías vehiculares. Este procedimiento tiene como propósito principal incrementar la resistencia del suelo para que pueda tolerar mayores cargas y reducir su susceptibilidad ante procesos erosivos y alteraciones en su estructura. Es importante mencionar que la subrasante constituye el estrato de suelo que se encuentra por debajo de la capa base del pavimento, funcionando como el elemento de apoyo que recibe y distribuye las fuerzas generadas por el paso de los vehículos.

Densidad Seca Máxima

Representa el valor más elevado de densidad que puede obtenerse en un suelo mediante procesos de compactación bajo condiciones específicas de humedad. Este parámetro se logra cuando el material se compacta empleando el contenido óptimo de humedad, definido como la proporción precisa de agua que permite alcanzar la máxima densificación del suelo. Dicho contenido óptimo constituye el punto de equilibrio donde la lubricación entre partículas facilita su mejor acomodamiento, generando la estructura más densa posible del material compactado (Cárdenas, 2008).

Estabilidad Volumétrica

El valor numérico, que representa la capacidad de un material para resistir deformaciones elásticas, estableciendo la relación entre la presión aplicada al material y el cambio proporcional en su volumen dentro de los límites elásticos del material, también conocido como módulo volumétrico (Cárdenas, 2008).

Módulo de Resiliencia

Representa un parámetro que determina la habilidad de un material para retener o disipar energía sin sufrir deformaciones irreversibles. Su determinación se realiza a través de pruebas de cargas repetidas bajo condiciones triaxiales y constituye un elemento clave en el cálculo y planificación de estructuras de pavimento asfáltico. Mediante el conocimiento de este valor es factible anticipar el comportamiento estructural del pavimento, incluyendo esfuerzos, deformaciones y deflexiones. No obstante, la obtención de este parámetro implica costos elevados debido a la instrumentación especializada requerida, lo cual restringe la accesibilidad de este ensayo en la mayoría de laboratorios especializados en materiales. Debido a esta limitación, los profesionales encargados del diseño de pavimentos frecuentemente emplean fórmulas de correlación para calcular el módulo resiliente, aunque típicamente estos valores estimados presentan diferencias importantes respecto a los resultados obtenidos mediante la prueba directa (Munera y Aguiar, 2019).

Límites de Atterberg o límites de consistencia

Los límites de consistencia representan parámetros geotécnicos esenciales que permiten caracterizar el comportamiento de los suelos finos frente a variaciones en su contenido de humedad. Estos valores definen las transiciones entre los estados sólido, plástico y líquido del suelo, y son especialmente relevantes en arcillas y limos. Su desarrollo se atribuye a Albert Atterberg, y su aplicación práctica fue estandarizada por Casagrande para fines ingenieriles.

Clasificación de los Límites

Límite Líquido (LL)

Este parámetro se refiere al contenido de humedad específico en el cual el material del suelo experimenta una transición de comportamiento, comenzando a manifestar propiedades similares a las de un fluido viscoso y perdiendo progresivamente su capacidad de resistencia al corte. La determinación de este valor se realiza a través de procedimientos estandarizados, siendo los más utilizados el ensayo con el aparato de Casagrande y el método alternativo del cono penetrante.

Límite Plástico (LP)

Representa el porcentaje mínimo de humedad necesario para que el suelo pueda ser moldeado y manipulado sin experimentar fracturas o fisuramiento. Cuando el contenido de agua se encuentra por debajo de este valor crítico, el material exhibe características frágiles y quebradizas, imposibilitando su trabajabilidad y deformación plástica. Este parámetro establece el umbral inferior donde el suelo transita desde un estado sólido rígido hacia una condición plástica manejable.

Índice de Plasticidad (IP)

Se calcula como $IP = LL - LP$. Este indicador constituye una herramienta fundamental para evaluar el grado de plasticidad que presenta el material del suelo, así como su capacidad potencial de experimentar deformaciones bajo diferentes condiciones de humedad. A través de este parámetro es posible determinar el rango de contenidos de agua.

Capacidad de Soporte California (CBR)

El CBR (California Bearing Ratio), denominado también como índice de resistencia de California (IRC), representa un método de evaluación utilizado para determinar la calidad relativa de los materiales del terreno en elementos estructurales como subrasantes, subbases y bases de sistemas de pavimentación. Este procedimiento fue desarrollado en 1929 por los ingenieros Stanton y Porter, pertenecientes al Departamento de Carreteras de California, razón por la cual recibe esta denominación específica.

La metodología consiste en la aplicación de cargas controladas sobre una superficie de contacto determinada, permitiendo la cuantificación de dos tipos de resistencias fundamentales: la resistencia al corte en el perímetro del área de contacto y la resistencia a la compresión del material ensayado. Es importante destacar que el CBR no constituye una propiedad intrínseca o constante del terreno, sino que funciona como un indicador específico de la resistencia al corte que presenta el suelo bajo condiciones particulares y controladas de humedad y densidad, las cuales se establecen previamente mediante la aplicación del ensayo de compactación del proctor modificado (Araujo, 2014).

Esta metodología puede ejecutarse tanto en condiciones de campo como en ambiente controlado de laboratorio. Para la evaluación del desempeño en terreno mediante ensayos de laboratorio, se utilizan representaciones gráficas que establecen la correlación entre el contenido de humedad y la densidad del material, denominadas "mapas de resistencia". En estos diagramas se delimitan las zonas donde se satisfacen los criterios de comportamiento requeridos en función de los

parámetros de humedad y densidad, las cuales reciben el nombre de "regiones de aceptación" (Sánchez, 2012).

Los ensayos de CBR desarrollados en laboratorio se efectúan sobre muestras que han sido reconstituidas y compactadas empleando el contenido de humedad óptimo y la densidad seca máxima correspondientes, parámetros que se obtienen mediante la aplicación del método proctor modificado, procedimiento que será descrito con mayor detalle en secciones posteriores del presente estudio.



Figura 1 : *Equipo para ensayos de California Bearing Ratio en campo.*

Fuente: American Society for Testing and Materials D4429-09a, 2009, p.3.

Las muestras experimentan un proceso de saturación que se extiende durante 96 horas, con el propósito de reproducir las condiciones más desfavorables posibles y identificar cualquier fenómeno de expansión que pueda presentarse. Se preparan como mínimo tres especímenes, los cuales son compactados aplicando

distintos niveles energéticos, empleándose comúnmente 56, 25 y 10 golpes respectivamente.

El procedimiento de CBR desarrollado en condiciones de laboratorio demanda la realización de tres evaluaciones fundamentales: la determinación y la evaluación de las características expansivas que pueda presentar el suelo, y la medición de su resistencia a la penetración normalizada (AASHTO, 2003).

El material empleado en el ensayo debe incorporar una fracción limitada de partículas que pasen a través del tamiz de 50 mm pero que sean retenidas por el tamiz de 20 mm. Se establece como recomendación técnica que esta fracción granulométrica no exceda el 20% del peso total de la muestra ensayada.

Los suelos con valores de CBR cercanos a cero denotan una baja calidad, lo que implica una deficiente resistencia a esfuerzos cortantes. Por otro lado, los valores de CBR cercanos al cien indican una excelente calidad del suelo (Sánchez, 2012). En la práctica, el número de CBR se emplea sin incluir el símbolo de porcentaje (%), presentándose como un número entero.

Ceniza

Pérez y Gardey (2016) sostienen: "Del latín cinisia, que a su vez proviene de cinis, el término ceniza alude al polvo grisáceo que resulta de un proceso de combustión. La ceniza está constituida por óxidos metálicos, sílice y otras sustancias. Las cenizas constituyen el residuo de una combustión. Por lo general

una parte de las cenizas permanece en la zona como polvo mientras que el resto se dispersa en el humo".

Cascarilla de Arroz

De acuerdo con los estudios realizados por Krishnarao, Subrahmanyam y Kumar (2001), la cascarilla de arroz constituye un tejido vegetal de naturaleza lignocelulósica cuya composición presenta aproximadamente un 85% de material de origen orgánico. Esta fracción orgánica se encuentra constituida principalmente por componentes estructurales como la celulosa y la lignina, así como por D-xilosa y proporciones menores de D-galactosa. Esta composición química particular confiere al material características específicas que determinan su comportamiento y potencial de aprovechamiento en diversas aplicaciones técnicas.

Ensayo de Proctor Estándar

En 1933, R.R. Proctor desarrolló la prueba conocida como proctor estándar. Este procedimiento consiste en tomar un espécimen de terreno de 3 kg, pasarlo a través de un tamiz de tamaño #4 y, si es necesario, incorporar agua. A continuación, se compacta esta mezcla de suelo en un molde de 944 cm³ en tres capas, aplicando 25 golpes por capa.

Cuando se requiere la reutilización del material durante el ensayo, se procede a extraer la muestra del molde y se obtienen porciones adicionales destinadas a determinar su contenido de humedad actual. Posteriormente, el material se disgrega hasta conseguir fragmentos cuyo tamaño máximo se aproxime al retenido por el tamiz #4. Seguidamente, se adiciona una cantidad mayor de agua,

se homogeniza la mezcla y se procede a compactar nuevamente el suelo dentro del molde de ensayo.

Este procedimiento se ejecuta de manera repetitiva múltiples veces hasta recopilar la información suficiente que permita construir una curva que relacione la MDS con el OCH del material. La curva resultante debe presentar un valor máximo claramente definido en términos de densidad seca, así como una cantidad adecuada de puntos experimentales distribuidos tanto en la rama ascendente como descendente de dicho valor máximo.

En este diagrama, la coordenada vertical correspondiente al punto máximo se denomina densidad máxima, mientras que el contenido de humedad asociado a este punto se conoce como humedad óptima del material (Araujo, 2014).

Ensayo de Proctor Modificado

Durante la segunda guerra mundial, las aeronaves de nueva generación y mayor peso requerían pistas de aeropuerto con una subrasante de mayor densidad. Como consecuencia, se introdujo la prueba de compactación modificada, que emplea una mayor energía de compactación.

De acuerdo con la norma ASTM D-1557, el ensayo de compactación modificada, la cual representa aproximadamente cinco veces la magnitud energética utilizada en la evaluación estándar de compactación. Esta mayor energía aplicada genera un incremento en la densidad del material que oscila entre 5% y 10%, acompañado de una disminución correspondiente en el contenido de humedad óptima requerido.

Es fundamental considerar que toda curva de compactación se ubicará invariablemente por debajo de la curva de saturación completa ($S = 100\%$), la cual incorporada en el diagrama de compactación una vez determinado el peso específico de los granos sólidos (G_s). De manera complementaria, es posible incluir en el mismo gráfico curvas correspondientes a diferentes grados de saturación, tales como aquellas que representan valores de S equivalentes a 90% y 80%, proporcionando así un marco de referencia más completo para el análisis.



Figura 2 : *El ensayo de Proctor Modificado aplica 4.5 veces el esfuerzo de compactación del ensayo de Proctor Estándar.*

Fuente: Proctor modificado - American Society for Testing and Materials D-1557.

Dosificación

En estos contextos, la dosificación implica la medición precisa y controlada de la cantidad de una sustancia o componente que se agrega a una mezcla o proceso. Puede involucrar el uso de instrumentos de medición como pipetas, balanzas, jeringas, medidores de volumen, entre otros, para asegurar la precisión en la cantidad añadida (Quispe, 2020)

2.3. Bases filosóficas

El desarrollo de las vías de comunicación se remonta a civilizaciones ancestrales. Los mesopotámicos fueron uno de los primeros en construir caminos alrededor del 3500 a.C. Los chinos también desarrollaron un sistema vial alrededor del siglo XI a.C. y construyeron la famosa ruta de la seda que perduró 2.000 años. En Sudamérica, los incas construyeron una extensa red de senderos que no eran estrictamente carreteras debido a la ausencia del uso de la rueda.

Los romanos fueron los constructores de carreteras más conocidos de la antigüedad. La Vía Apia y la vía flaminia son ejemplos destacados de sus construcciones, y en su apogeo, el imperio romano contaba con un sistema de carreteras de aproximadamente 80.000 km que se extendía por todas las provincias conquistadas, incluyendo Gran Bretaña.

Sin embargo, en el siglo XVII, el gobierno francés estableció un sistema para el mantenimiento de carreteras a nivel local, mientras que el parlamento permitió a compañías privadas cobrar peajes por su uso.

En el siglo XVIII, en Francia, se estableció la primera escuela de ingeniería del mundo. Hubert Gautier, de origen francés, propone la técnica de estabilización de suelos arcillosos mediante la mezcla con grava. Por otro lado, Pierre-Marie-Jerome Trésaguet desarrolla un sistema codificado para la construcción de carreteras, el cual consiste en reducir los espesores y construir las en capas sucesivas de piedra partida con superficie sólida. Al existir la creación de este tipo de trochas carrozables también se derivó la necesidad de la estabilización de los suelos de estas subrasantes (Burgos y Hernández, 2009).

Aunque los primeros desarrollos en estabilización de suelos se iniciaron durante la década de 1930, su avance más notable no se materializa hasta los años 1950. Este progreso se encuentra directamente relacionado con el impulso experimentado en la construcción de infraestructura vial nueva y el mejoramiento. La estabilización se alcanza mediante la incorporación de agentes conglomerantes, subproductos de origen industrial y materiales provenientes de procesos de reciclaje. Esta metodología permite la conservación de materias primas de valor, tales como gravas y agregados pétreos de alta calidad, mientras se procura minimizar los efectos adversos sobre el medio ambiente, particularmente aquellos vinculados con la utilización de materiales que contienen alquitrán en su composición (Neussner, 2001).

2.4. Definición de Términos Básicos

Estabilización

De acuerdo con la definición proporcionada por la Real Academia Española [RAE] (2014), este término hace referencia al conjunto de procesos mediante los cuales se implementan acciones o medidas específicas destinadas a preservar o recuperar un estado de equilibrio, seguridad y estabilidad en una situación o sistema particular. Este concepto implica la aplicación de técnicas y procedimientos que buscan asegurar la permanencia de condiciones deseables o corregir desviaciones que puedan comprometer la funcionalidad del elemento o sistema en cuestión.

Subrasante

"El suelo de fundación representa la base directa sobre la cual se establece toda la estructura del sistema de pavimentación y constituye un elemento integral del cuerpo vial, extendiéndose desde la superficie del terreno natural previamente nivelado o plataforma de trabajo hasta el inicio de la estructura del pavimento propiamente dicha. Este componente fundamental proporciona el soporte necesario para la transmisión y distribución de las cargas vehiculares hacia el terreno subyacente" (MEF, 2015).

Trocha Carrozable

"Se refieren a caminos de tránsito que no alcanzan las especificaciones geométricas establecidas para una carretera convencional, caracterizándose por mantener un Índice Medio Diario Anual (IMDA) por debajo de 200 vehículos diarios. La superficie de rodadura debe contar con una anchura mínima de 4,00 metros, siendo necesario construir ensanchamientos llamados áreas de paso o encuentro vehicular, ubicados como máximo cada 500 metros de distancia" (MEF, 2015).

Ceniza

Según establece la Real Academia Española [RAE] (2014), la ceniza se forma como resultado de un proceso de combustión completa y se encuentra constituida fundamentalmente por sales alcalinas y térreas, sílice y diversos óxidos metálicos. Este material representa el residuo sólido final que subsiste tras el proceso de incineración de una sustancia determinada, tales como madera, carbón, papel u otros compuestos de naturaleza orgánica. La composición química específica de la ceniza presenta variaciones significativas en función del tipo de

material que ha sido sometido al proceso de combustión, determinando así sus propiedades y características particulares.

Cascarilla de arroz

La cáscara de arroz constituye un subproducto residual que se obtiene durante las operaciones de procesamiento y beneficio del cereal cultivado en las regiones agrícolas especializadas. Este material se localiza en la porción externa del grano completamente desarrollado y está conformado por dos estructuras protectoras denominadas palea y lemma, las cuales permanecen unidas entre sí a través de formaciones de tipo gancho que aseguran su cohesión natural. Esta composición estructural proporciona al grano la protección necesaria durante su desarrollo y maduración (Vargas et al., 2013).

Humedad Natural

Con este ensayo de laboratorio se determina la humedad de la muestra de suelo obtenida mediante las calicatas obtenidas, se obtiene mediante la reducción de la masa tras el secado y su pérdida de agua, para lo cual se requiere horas de secado y se obtendrá el agua que está contenida en la muestra. Con el fin de obtener la relación que existe en el comportamiento del suelo y las propiedades que adquiere, de la cual se dará la relación entre el aire contenido, agua y el volumen de la muestra. El ensayo se llevará en base a la normativa del MTC E 108, con la cual obtendremos OCH y el CBR del suelo.

Clasificación de Suelos

La categorización de suelos posibilita caracterizar las propiedades que presentan los diferentes tipos de suelo, fundamentándose en la granulometría de sus componentes y su comportamiento plástico. Se han desarrollado diversos

métodos de clasificación: categorización textural, sistema AASHTO, y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Sistema de clasificación AASHTO

El sistema AASHTO establece una organización sistemática de los suelos basándose en múltiples parámetros fundamentales, incluyendo la distribución granulométrica de sus partículas, el límite líquido (LL), el índice de plasticidad (IP), y el índice de grupo (IG). Este último parámetro presenta un rango de valores que fluctúa entre 0 y 20, donde el valor inferior (0) señala la completa ausencia de características plásticas en el material, mientras que el valor superior (20) denota la presencia de plasticidad elevada. Esta metodología de clasificación permite una evaluación integral de las propiedades mecánicas y de comportamiento de los diferentes tipos de suelo.

Límites de Atterberg o límites de consistencia

Los límites de Atterberg nos permiten determinar mediante ensayos de laboratorio las características de los suelos finos, según el rango de humedad obteniendo así los límites de los estados de consistencia de la muestra de suelo.

Con el fin de obtener los límites de Atterberg se realiza con muestras de suelo que sean menores a la malla #40 (0.42mm).

Contenido de Humedad (w)

Es la magnitud que expresa la cantidad de agua que contiene la muestra en porcentaje, a la cual se le define como la relación entre peso del agua y el peso de suelo seco de la muestra.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

W_w =Peso del Agua

W_s =Peso suelo seco

Limite Liquido (w_L o LL)

Determina el contenido de agua con el cual la muestra de suelo cambia su estado y adquiere la consistencia plástica o semi-liquida con capacidad de fluir a bajos esfuerzos, la cual se realizará con la utilización de una cuchara normalizada (cucharón de Casagrande).

$$w_L = wx \left(\frac{N}{25} \right)^{tan\alpha} \quad \text{Ecuación 2}$$

α = Inclinación curva de flujo

N= Número de golpes

w= Contenido de humedad correspondiente a N

Limite plástico (w_p o LP)

Determina el contenido de humedad con el cual la muestra de suelo con la cual la consistencia entra en estado semi-solido al estado plástico.

$$LP = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad \text{Ecuación 3}$$

Índice de Plasticidad (IP)

Se determina mediante la diferencia entre el límite líquido y plástico.

$$IP = LL - LP \quad \text{Ecuación 4}$$

Por lo cual el índice de plasticidad nos permite determinar el contenido de húmedo de la muestra de suelo en estado plástico antes de la que su consistencia se comporte como un líquido. La clasificación de los suelos se dará en el siguiente cuadro.

Granulometría

El propósito del análisis granulométrico es que nos permite determinar las características físicas del suelo como lo son el tamaño de partículas que componen la muestra del suelo, y así clasificarlas según el diámetro que poseen, y conjuntamente con los límites de Atterberg determinar el tipo de suelo que se posee.

Para lo cual se procede con el tamizado y se realiza la curva granulométrica representando así los tamaños de las partículas vs el porcentaje que se retienen, las mallas estarán en el intervalo de 125mm – 0.075mm, para tamaños menores se realiza mediante la sedimentación usando el higrómetro.

Los ensayos que se realizarán se fundamentan en normativas técnicas específicas, incluyendo la ASTM D421 que establece el procedimiento estandarizado, así como la ASTM D422 que define la metodología para el análisis granulométrico de materiales del suelo. Adicionalmente, se emplea como referencia normativa el manual de carreteras especializado en suelos, geología, geotecnia y pavimentos desarrollado por el MTC, el cual proporciona los lineamientos técnicos específicos para el contexto nacional.

Peso Unitario

El ensayo nos permite determinar el peso de la muestra con respecto al volumen que ocupa, lo cual suele variar según el agua que contenga la muestra, los cuales se darán en peso unitario húmedo (no saturado), saturado y seco.

El peso unitario de la muestra, viene a ser representado entre el peso del suelo no saturado por el volumen del recipiente.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \text{Ecuación 5}$$

El peso unitario seco, será el peso suelo previamente secado sin contenido de agua por el volumen del recipiente.

$$\gamma = \frac{W_s}{V} \quad \text{Ecuación 6}$$

El peso unitario húmedo, será representado como el peso de la muestra saturada por el volumen del recipiente.

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} \quad \text{Ecuación 7}$$

2.5. Hipótesis de Investigación

2.5.1. Hipótesis General

La adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% influye favorablemente en la estabilización mejorando así las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

2.5.2. Hipótesis Específicas

La adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% influye favorablemente en los límites de consistencia de Atterberg de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

La adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% influye favorablemente en el ensayo de proctor modificado de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

La adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% influye favorablemente en la capacidad de soporte de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

2.6. Operacionalización de variables

Tabla 1 :*Operacionalización de las variables.*

Variable Dependiente				
VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Estabilización de la subrasante	La estabilización de la subrasante se refiere a la mejora de las características del suelo de la capa de subrasante de una carretera o trocha carrozable, con el fin de aumentar su capacidad portante y reducir su susceptibilidad a la deformación y la erosión. La subrasante es la capa de suelo	La estabilización de la subrasante es comprobada mediante el análisis de su densidad seca máxima, estabilidad volumétrica, esto nos ayuda a establecer una capacidad de CBR adecuada que sea	Límites de consistencia de Atterberg Proctor Modificado Capacidad de soporte california (CBR)	<ul style="list-style-type: none"> - Límite plástico. - Límite líquido. - Densidad seca máxima - Contenido de humedad óptimo - Muy pobre <2% - Pobre 2% - 5% - Regular 5% - 10% - Buena 10% - 15%

situada debajo de la capa de base de mayor al 6% para el - Muy buena >15%

la carretera, y es la capa que soporta diseño de un pavimento

la carga del tráfico vehicular (MEF, 2015).

Variable Independiente

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Ceniza de cascarilla de arroz	La ceniza de la cascarilla de arroz es un subproducto generado durante la quema de la cascarilla de arroz, que es la capa externa del grano de arroz que se elimina durante el proceso de molienda. La cascarilla de arroz es un residuo que se genera en grandes cantidades en la producción de arroz, y la quema de la cascarilla de arroz se realiza a	La cascarilla de arroz será suministrada en porcentajes de 2,4 y 6% respectivamente en cada diseño de CBR, con ello se podrá obtener valores referenciales de la	Dosificación (%) Ensayos químicos	- Adición de ceniza 2% - Adición de ceniza 4% - Adición de ceniza 6%

menudo como una forma de eliminación de capacidad de soporte
residuos. del suelo.

Capítulo III: Metodología

3.1. Diseño metodológico

Tipo de investigación

La naturaleza de la investigación llevada a cabo se identificó como aplicada, debido a que su objetivo principal es generar conocimiento que pueda aplicarse directamente a los problemas que enfrenta la sociedad o el sector productivo. Esta forma de investigación se basa principalmente en los descubrimientos tecnológicos obtenidos a partir de la investigación básica, y su enfoque se centra en establecer un vínculo entre la teoría y el desarrollo de productos o soluciones prácticas (Lozada, 2014).

Nivel de investigación

El nivel de la investigación es explicativo, ya que busca identificar y analizar las causas y efectos de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso. Este nivel permite establecer relaciones causales entre las variables estudiadas, como el porcentaje de ceniza y su influencia en la densidad seca máxima, la humedad óptima y el índice de soporte del suelo. Al explicar los cambios observados, la investigación contribuye a generar conocimientos aplicables en el ámbito de la estabilización de suelos para infraestructura vial (Tamayo y Tamayo, 2011).

Diseño de investigación

La investigación en cuestión realiza la manipulación de al menos una variable independiente para analizar el impacto que tiene en las variables dependientes, lo que la clasifica como un diseño cuasiexperimental.

El diseño cuasiexperimental se distingue por seleccionar sujetos no al azar, sino a partir de grupos preexistentes antes de los ensayos (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio, 2014).

Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación presentada es cuantitativo, dado que implica la recopilación de datos de campo como primer paso, seguido del diseño y la realización de pruebas correspondientes. Además, se validará cada hipótesis mediante los resultados obtenidos.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población de la investigación se tomará la trocha carrozable Huanja- Jangas – Huaraz –Ancash- 2023 de 3 km de longitud.

3.2.2. Muestra

La muestra es considerada el conjunto de poblaciones donde van a poseer características particulares en común, en nuestro caso, el muestreo será de manera no aleatoria. Teniendo un análisis de una trocha de 3 km y de acuerdo con la norma técnica peruana se debe realizar un ensayo de calicata cada 1km dándonos un total de 3 ensayos de (Limites de Atterberg, Proctor, CBR) en toda la vía.

Tabla 2 :

Espécimen, CBR y parcial para la recolección de datos.

ESPECIMEN	CBR	PARCIAL
SIN ADITIVO	3 molde	3 moldes
CON ADITIVO 2%	3 molde	3 moldes
CON ADITIVO 4%	3 molde	3 moldes
CON ADITIVO 6%	3 molde	3 moldes
	Total	12 moldes

3.3. Técnicas de recolección de datos:

Tabla 3 :

Técnica e instrumento para la recolección de datos.

TÉCNICA	INSTRUMENTO
Observación participante	Estudio de mecánica de suelos
Visita Técnica	Calicatas

3.4. Técnicas para el procesamiento de información:

En la investigación se trabajó con datos de campo para poder desarrollar el problema, todo este procedimiento lo dividimos en un grupo de 4 pasos, para alcanzar los objetivos propuestos:

Lo primero que se realiza son las calicatas, el número de calicatas dependerá según el tipo de vía y la longitud de la misma, esta calicata tendrá una altura hasta la base de calicata de 1.50 metros, y se extraerá muestra para determinar el CBR del suelo y ver si resistirá el tránsito proyectado o hacer el cambio de subbase.

Lo segundo que se realiza son los ensayos de las muestras a usar, para las respectivas dosificaciones; con los ensayos de granulometría, humedad natural, peso específico, peso unitario, sales solubles, sulfatos solubles y cloruro solubles; entre otros ensayos que se vean necesarios para realizar el diseño.

Lo tercero se realizará pruebas con probetas, y con ello se verá las resistencias de CBR; y hacemos las comparaciones entre resistencia y dosificación de CCA, presentándose con cuadros comparativos (con pros y contras en el uso a cierto porcentaje).

Capítulo IV: Resultados

4.1. Análisis de Resultados

O.E.1. Determinar la incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en los límites de consistencia de Atterberg de la en la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

Tabla 4 :

Estadística descriptiva de los límites de Atterberg.

% CCA	n	Media LL	DE LL	CV% LL	Media LP	DE LP	CV% LP	Media IP	DE IP	CV% IP
0%	3	30.06	0.08	0.26	21.32	0.12	0.57	8.74	0.05	0.52
2%	3	27.89	0.12	0.43	17.09	0.07	0.38	10.79	0.13	1.17
4%	3	28.07	0.05	0.16	17.25	0.07	0.38	10.82	0.11	1.02
6%	3	27.45	0.10	0.38	16.90	0.06	0.33	10.55	0.06	0.56

Nota: Elaboración propia

Los resultados del análisis de los límites de Atterberg muestran una clara influencia de la ceniza de CCA en las propiedades de consistencia del suelo de la subrasante. El límite líquido presenta una disminución progresiva desde 30.06% (0% CCA) hasta 27.45% (6% CCA), mientras que el límite plástico también decrece de 21.32% a 16.90% con los mismos porcentajes.

El índice de plasticidad muestra una tendencia diferente, aumentando inicialmente desde 8.74% (0% CCA) hasta alcanzar un máximo de 10.82% con 4% de CCA, para luego disminuir ligeramente a 10.55% con 6% de CCA. La precisión de los ensayos se confirma con coeficientes de variación bajos (menores a 1.2%) y desviaciones estándar reducidas, lo que indica una alta confiabilidad en los resultados obtenidos.

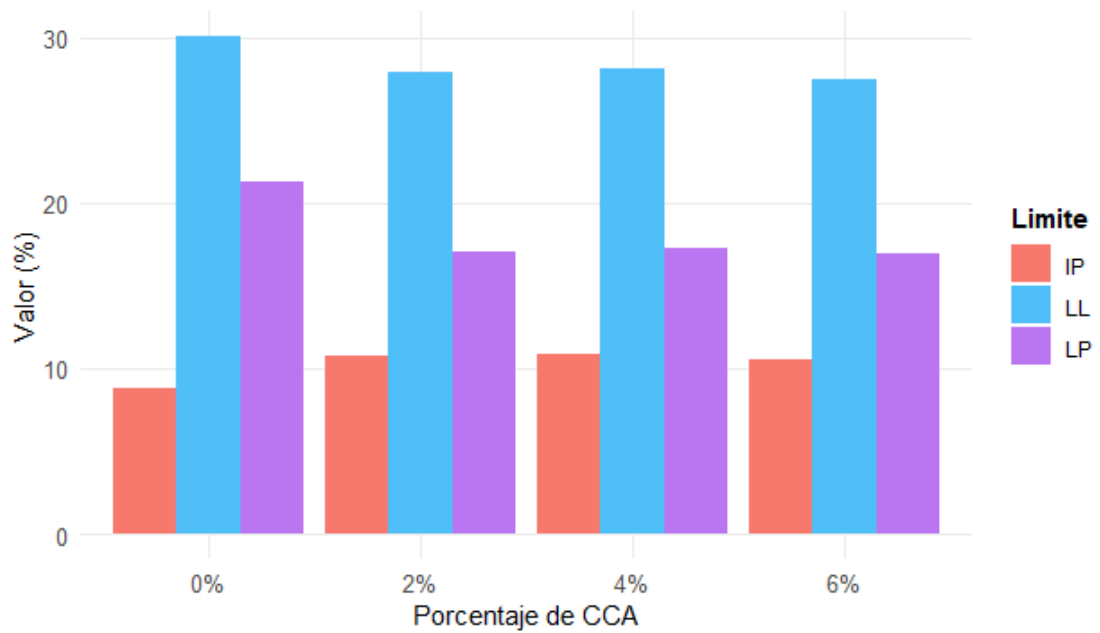


Figura 3 : Límites de atterberg por porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz.

Nota: Elaboración propia

La primera gráfica de barras ilustra la distribución de los límites de Atterberg según el porcentaje de CCA, donde se observa que el límite líquido (LL) mantiene los valores más altos, pero con tendencia decreciente desde 30% hasta 27.45%, mientras el límite plástico (LP) muestra una disminución más pronunciada de 21.32% a 16.90%, y el índice de plasticidad (IP) presenta un ligero incremento de 8.74% a aproximadamente 10.55%.

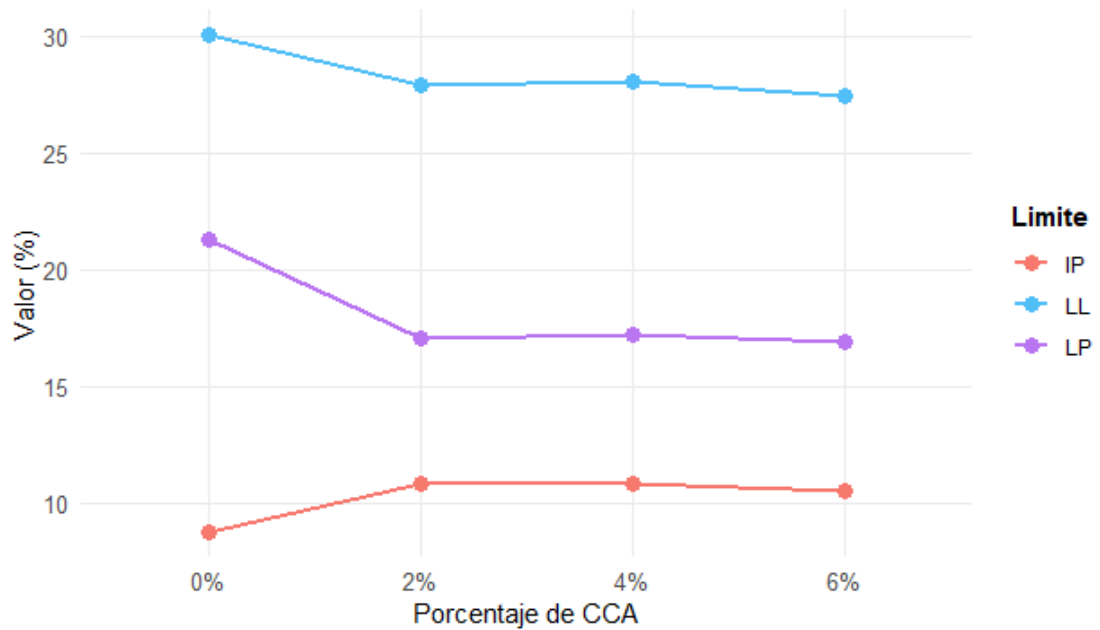


Figura 4 : *Tendencia de los límites de Atterberg.*

Nota: Elaboración propia

La segunda gráfica de líneas muestra las tendencias de los límites de Atterberg, evidenciando una pendiente descendente gradual para el LL (línea azul) y una caída más pronunciada para el LP (línea morada) hasta el 2% de CCA, después de lo cual ambos se estabilizan; mientras que el IP (línea roja) muestra un incremento inicial hasta el 2% de CCA y luego se mantiene relativamente constante alrededor del 10.5%.

HIPÓTESIS DE LAS PRUEBAS ESTADÍSTICAS

Prueba de Shapiro-Wilk

H0: Los datos siguen una distribución normal

H1: Los datos no siguen una distribución normal

Tabla 5 :*Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.*

Parámetro	Estadístico	p.valor	Conclusión
Límite Líquido	0.8929	0.3631	Normal
Límite Plástico	0.9643	0.6369	Normal
Índice de Plasticidad	0.9959	0.8777	Normal

Nota: Elaboración propia

Todos los parámetros siguen una distribución normal ($p > 0.05$)

Esto permite el uso de pruebas paramétricas como ANOVA

Prueba de Levene

H0: Las varianzas son homogéneas

H1: Las varianzas no son homogéneas

Tabla 6 :*Resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene.*

Parámetro	F.valor	p.valor	Conclusión
Límite líquido	0.2131	0.8846	Homocedasticidad
Límite plástico	0.4434	0.7285	Homocedasticidad
Índice de plasticidad	0.6355	0.6128	Homocedasticidad

Nota: Elaboración propia

Las varianzas son homogéneas para todos los parámetros

Se cumple el supuesto de homocedasticidad para ANOVA

ANOVA

H0: Las medias de todos los grupos son iguales

H1: Al menos una media es diferente

Tabla 7 :*Resultados del análisis de varianza (ANOVA).*

Parámetro	F.valor	p.valor	Conclusión
Límite líquido	480.4738	2.27888e-09	Hay diferencias significativas
Límite plástico	2041.1115	7.12875e-12	Hay diferencias significativas
Índice de plasticidad	355.9563	7.50115e-09	Hay diferencias significativas

Nota: Elaboración propia

Existen diferencias significativas en todos los parámetros

La adición de CCA tiene un efecto significativo en los límites de Atterberg

O.E.2. Determinar la incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en la densidad de campo y ensayo de proctor modificado de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.

Tabla 8 :*Estadística descriptiva de proctor modificado.*

% CCA	n	Media Densidad	DE Densidad	CV% Densidad	Media Humedad	DE Humedad	CV% Humedad
0%	3	1.82	0.00	0.0	9.08	0.07	0.77
2%	3	1.93	0.01	0.3	10.16	0.02	0.20
4%	3	1.92	0.01	0.3	10.88	0.07	0.64
6%	3	1.93	0.01	0.3	11.77	0.14	1.19

Nota: Elaboración propia

Los resultados muestran que la densidad aumenta inicialmente de 1.82 g/cm³ (0% CCA) a 1.93 g/cm³ (2% CCA), manteniéndose luego relativamente constante hasta el 6% de CCA. En cuanto a la humedad, se observa un incremento progresivo desde 9.08% (0% CCA) hasta 11.77% (6% CCA), con coeficientes de variación bajos que indican buena precisión en los ensayos, excepto para el 6% de CCA donde la variabilidad es ligeramente mayor (CV=1.19%).

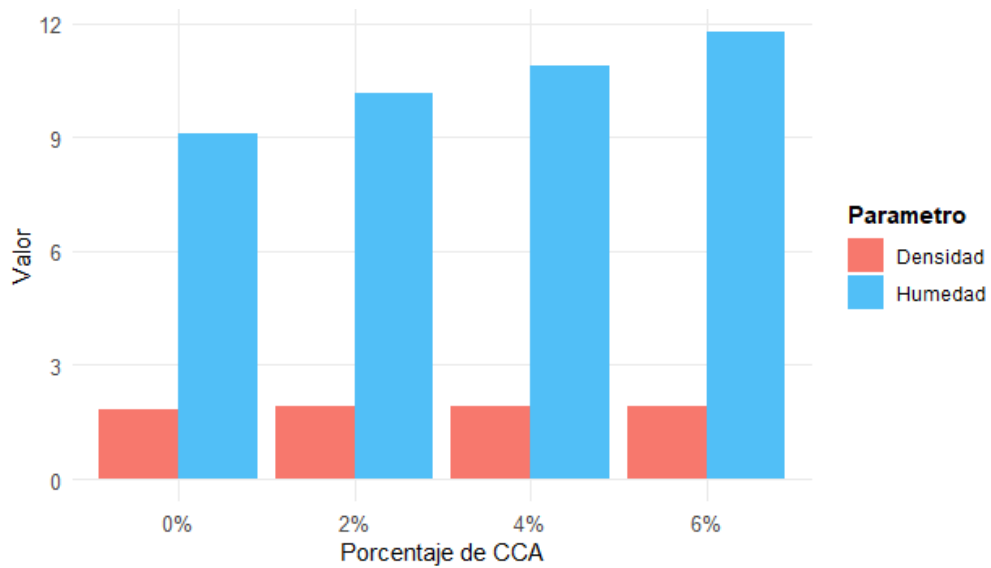


Figura 5 : Densidad y humedad por porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz.

Nota: Elaboración propia

La gráfica de barras muestra claramente el contraste entre densidad y humedad, donde la densidad mantiene valores estables cercanos a 1.93 g/cm³ después del 2% de CCA, mientras la humedad presenta un incremento constante desde 9.08% hasta 11.77% conforme aumenta el porcentaje de CCA.

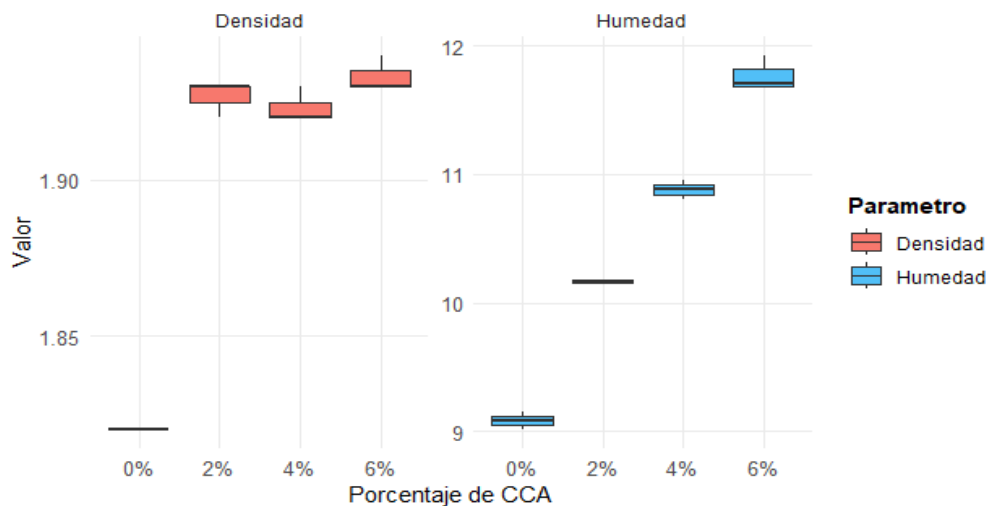


Figura 6 : Distribución de densidad y humedad.

Nota: Elaboración propia

La gráfica de box plots revela la distribución y variabilidad de los datos, donde la densidad muestra una dispersión mínima después del 2% de CCA, mientras que la humedad exhibe mayor variabilidad, especialmente en el 6% de CCA.

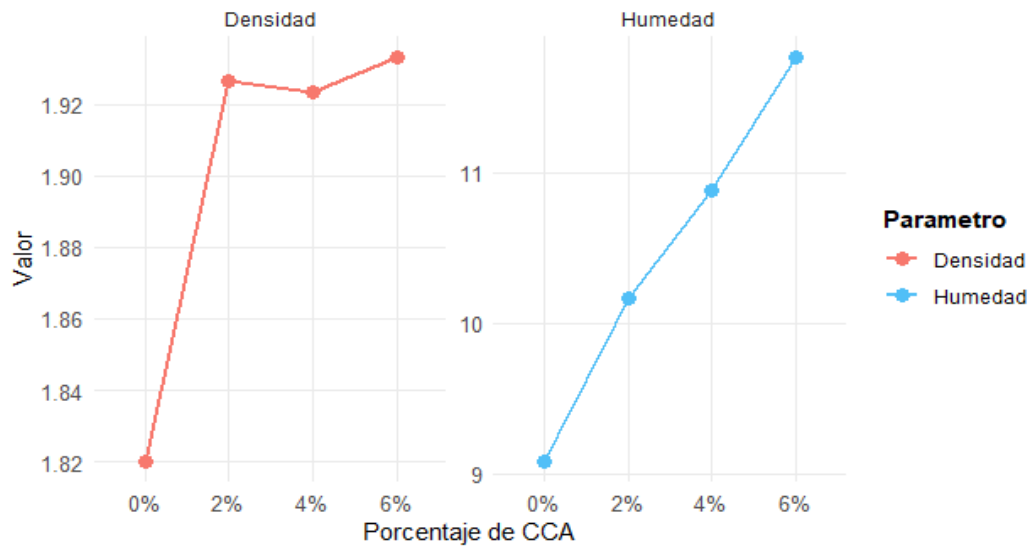


Figura 7 : *Tendencia de densidad y humedad.*

Nota: Elaboración propia

La gráfica de líneas confirma estas tendencias, mostrando un aumento brusco inicial en la densidad que luego se estabiliza, y un incremento lineal sostenido en la humedad a lo largo de todos los porcentajes de CCA.

HIPÓTESIS DE LAS PRUEBAS ESTADÍSTICAS

Prueba de Shapiro-Wilk

H0: Los datos siguen una distribución normal

H1: Los datos no siguen una distribución normal

Tabla 9 :

Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

Parámetro	Estadístico	p.valor	Conclusión
Densidad	0.6467	0.0003	No normal
Humedad	0.9172	0.2639	Normal

Nota: Elaboración propia

Ambos parámetros siguen una distribución normal ($p > 0.05$)

Esto permite el uso de pruebas paramétricas como ANOVA

Prueba de Levene

H0: Las varianzas son homogéneas

H1: Las varianzas no son homogéneas

Tabla 10 :

Resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene.

Parámetro	F.valor	p.valor	Conclusión
Densidad	0.3333	0.8018	Homocedasticidad
Humedad	0.6267	0.6177	Homocedasticidad

Nota: Elaboración propia

Las varianzas son homogéneas para ambos parámetros

Se cumple el supuesto de homocedasticidad para ANOVA

ANOVA

H0: Las medias de todos los grupos son iguales

H1: Al menos una media es diferente

Tabla 11 :

Resultados del análisis de varianza (ANOVA).

Parámetro	F.valor	p.valor	Conclusión
Densidad	350.5556	7.97018e-09	Hay diferencias significativas
Humedad	520.7866	1.65416e-09	Hay diferencias significativas

Nota: Elaboración propia

Existen diferencias significativas en ambos parámetros

La adición de CCA tiene un efecto significativo en la densidad y humedad

O.E.3. Evaluar la capacidad de soporte de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023 adicionando ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6%.

Tabla 12 :

Estadísticas descriptivas CBR 100%.

% CCA	N	Media CBR	DE CBR	CV% CBR
0%	3	11.74	0.12	1.03
2%	3	15.40	2.27	14.73
4%	3	15.38	2.35	15.28
6%	3	15.47	2.25	14.57

Nota: Elaboración propia

Los resultados del CBR al 100% muestran un incremento significativo con la adición de CCA. El valor inicial de 11.74% sin CCA aumenta hasta 15.47% con 6% de CCA. Los coeficientes de variación son más altos que en los ensayos anteriores, especialmente en las muestras con CCA (14-15%), lo que indica mayor variabilidad en los resultados, aunque se mantienen dentro de rangos aceptables para ensayos de suelos.

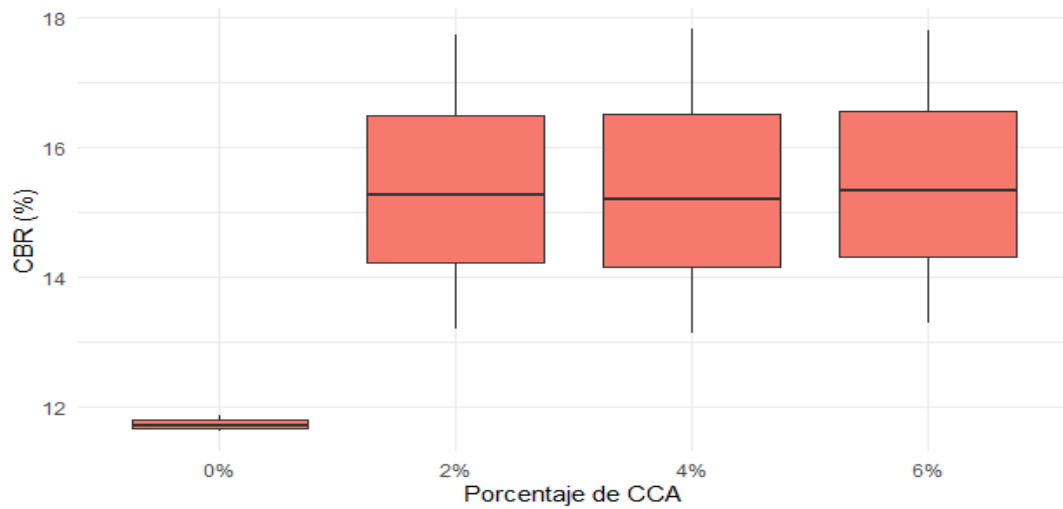


Figura 8 : *Distribución de California Bearing Ratio 100% por porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz.*

Nota: Elaboración propia

La gráfica de box plots muestra una clara diferencia en la distribución del CBR entre el suelo sin CCA (0%) y las muestras con adición de CCA. Mientras que la muestra control (0%) muestra una distribución muy compacta alrededor de 11.74%, las muestras con 2%, 4% y 6% de CCA muestran valores más altos (cerca de 15.4%) con mayor dispersión, evidenciada por las cajas más amplias y los bigotes más largos, lo que confirma la variabilidad observada en los coeficientes de variación.

Tabla 13 :

Estadísticas descriptivas CBR 95%.

% CCA	N	Media CBR	DE CBR	CV% CBR
0%	3	7.22	0.12	1.63
2%	3	12.13	2.01	16.53
4%	3	12.18	2.11	17.28
6%	3	12.17	2.09	17.14

Nota: Elaboración propia

Los resultados del CBR al 95% muestran un incremento significativo desde 7.22% (0% CCA) hasta aproximadamente 12.17% (6% CCA). Similar al CBR 100%, se observa mayor variabilidad en las muestras con CCA, con coeficientes de variación entre 16-17%, mientras la muestra control muestra mayor uniformidad (CV=1.63%).

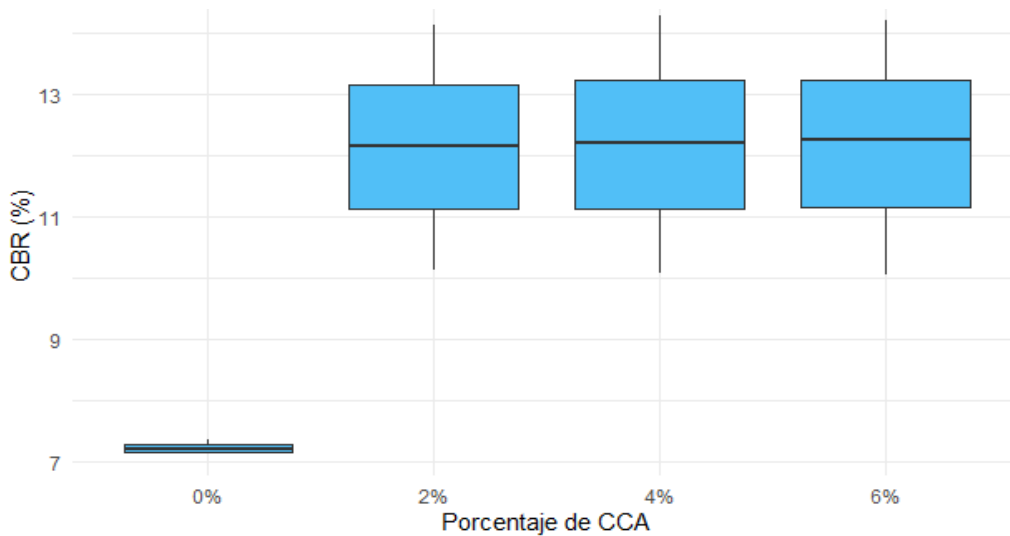


Figura 9 : Distribución de California Bearing Ratio 95% por porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz.

Nota: Elaboración propia

La gráfica de box plots para el CBR al 95% muestra un patrón similar al CBR 100%, con un salto significativo entre la muestra control (7.22%) y las muestras con CCA ($\approx 12\%$). Las muestras con CCA (2%, 4% y 6%) muestran mayor dispersión en sus valores, evidenciada por cajas más amplias, mientras la muestra sin CCA presenta una distribución muy compacta.

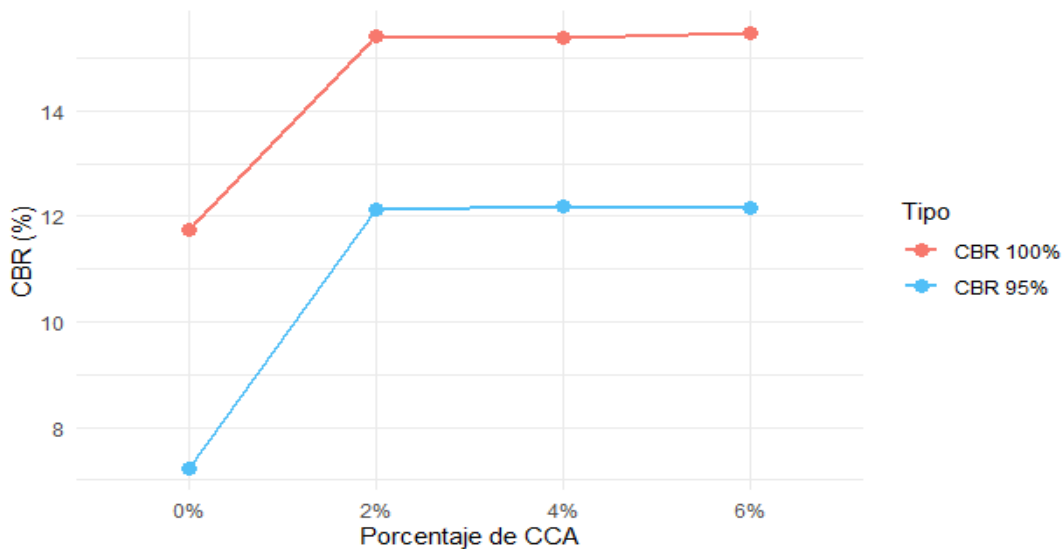


Figura 10 : Comparación de California Bearing Ratio 100% y 95%

Nota: Elaboración propia

La gráfica de líneas muestra claramente la diferencia entre CBR 100% y 95% a través de los distintos porcentajes de CCA. Ambos valores experimentan un incremento significativo del 0% al 2% de CCA (CBR 100% de 11.74% a 15.40% y CBR 95% de 7.22% a 12.13%), para luego estabilizarse con variaciones mínimas hasta el 6% de CCA, manteniendo una diferencia constante de aproximadamente 3 puntos porcentuales entre ambos niveles de compactación.

HIPÓTESIS DE LAS PRUEBAS ESTADÍSTICAS

Prueba de Shapiro-Wilk

H0: Los datos siguen una distribución normal

H1: Los datos no siguen una distribución normal

Tabla 14 :

Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

Parámetro	Estadístico	p.valor	Conclusión
CBR 100%	0.8791	0.0853	Normal
CBR 95%	0.8871	0.1081	Normal

Nota: Elaboración propia

Ambos parámetros siguen una distribución normal ($p > 0.05$)

Esto permite el uso de pruebas paramétricas como ANOVA

Prueba de Levene

H0: Las varianzas son homogéneas

H1: Las varianzas no son homogéneas

Tabla 15 :

Resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene.

Parámetro	F.valor	p.valor	Conclusión
CBR 100%	1.1622	0.3824	Homocedasticidad
CBR 95%	1.1836	0.3753	Homocedasticidad

Nota: Elaboración propia

Las varianzas son homogéneas para ambos parámetros

Se cumple el supuesto de homocedasticidad para ANOVA

ANOVA

H0: Las medias de todos los grupos son iguales

H1: Al menos una media es diferente

Tabla 16 : Resultados del análisis de varianza (ANOVA).

Parámetro	F.valor	p.valor	Conclusión
CBR 100%	2.571349	0.1269764	No hay diferencias significativas
CBR 95%	5.716823	0.0217397	Hay diferencias significativas

Nota: Elaboración propia

Existen diferencias significativas en ambos parámetros, la adición de CCA tiene un efecto significativo en el CBR tanto al 100% como al 95%

Capítulo V: Discusión

5.1. Discusión de Resultados

O.E.1. Discusión sobre la incidencia de la ceniza de cascarilla de arroz en los límites de consistencia de Atterberg:

Los resultados obtenidos muestran una clara influencia de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) en los límites de consistencia del suelo. Se observó una disminución progresiva del límite líquido desde 30.06% (0% CCA) hasta 27.45% (6% CCA), y del límite plástico de 21.32% a 16.90%. Estos hallazgos son consistentes con los reportados por Barragán y Cuervo (2019), quienes encontraron que la adición de CCA modifica significativamente las propiedades de plasticidad del suelo. Sin embargo, mientras que en nuestro estudio el índice de plasticidad aumentó inicialmente de 8.74% a 10.82% con 4% de CCA, en su investigación observaron una tendencia diferente.

Esta variación en los resultados puede explicarse por lo encontrado por Andaluz (2022), quien demostró que el efecto de la CCA en las propiedades del suelo depende en gran medida de las características iniciales del material. En su estudio con suelos del cantón Puyo, encontró que la respuesta a la adición de CCA variaba según la composición mineralógica del suelo base.

La tendencia decreciente en los límites líquido y plástico puede atribuirse a las propiedades puzolánicas de la CCA, como lo señalan Loaiza, Correa y Gómez (2020) en su investigación. Ellos explican que la sílice presente en la CCA interactúa con los minerales del suelo, modificando su estructura y reduciendo su capacidad de

retención de agua. Este fenómeno explica la reducción observada en ambos límites de consistencia.

O.E.2. Discusión sobre la incidencia de la ceniza de cascarilla de arroz en la densidad de campo y ensayo de proctor modificado:

Los resultados de densidad mostraron un incremento significativo inicial de 1.82 g/cm^3 (0% CCA) a 1.93 g/cm^3 (2% CCA), manteniéndose luego relativamente estable. Este comportamiento coincide con lo reportado por Cristobal y Quinte (2022), quienes observaron un aumento similar en la densidad máxima seca con la adición de cenizas vegetales. En su caso, con ceniza de eucalipto, reportaron un incremento del 10.45% en la densidad máxima seca con una adición del 10%.

El contenido de humedad óptimo mostró un incremento progresivo desde 9.08% hasta 11.77% con 6% de CCA, lo cual es consistente con los hallazgos de Carrasco (2022), quien también observó un aumento en la humedad óptima al incorporar CCA en suelos de subrasante. Esta tendencia puede explicarse por la alta capacidad de absorción de agua de la CCA, como lo señalan López (2021) en su investigación con suelos arcillosos.

La estabilización de la densidad después del 2% de CCA sugiere un punto óptimo de adición, similar a lo encontrado por Chayña (2022), quien determinó que existe un porcentaje crítico de adición de cenizas vegetales más allá del cual no se obtienen mejoras significativas en las propiedades físicas del suelo.

O.E.3. Discusión sobre la capacidad de soporte de la subrasante con adición de ceniza de cascarilla de arroz:

Los resultados del CBR mostraron un incremento significativo tanto al 100% como al 95% de compactación. El CBR al 100% aumentó de 11.74% a 15.47% con 6% de CCA, mientras que al 95% se incrementó de 7.22% a 12.17%. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Andaluz (2022), quien reportó incrementos en el CBR desde 7.80% hasta 12.10% en suelos del sector de Santa Isabel.

La mejora en la capacidad de soporte puede atribuirse a las reacciones puzolánicas de la CCA, como lo explican Galindo, Chinchilla y Sierra (2019) en su investigación con ceniza de bagazo de caña. El incremento más pronunciado se observó con la adición inicial de CCA (2%), similar a lo reportado por Hernández y Pérez (2021), quienes encontraron que las primeras adiciones de materiales estabilizantes suelen producir los mayores incrementos en la capacidad portante.

La estabilización de los valores de CBR después del 2% de CCA sugiere un punto óptimo de adición, coincidiendo con lo observado por Valdivia y Quijano (2021) en su investigación con ceniza de carbón y tusa de maíz. Este comportamiento indica que existe un porcentaje óptimo de adición más allá del cual no se obtienen mejoras significativas en la capacidad de soporte.

Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

O.E.1. Sobre la incidencia de la ceniza de cascarilla de arroz en los límites de consistencia de Atterberg:

La adición de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) influye significativamente en los límites de consistencia del suelo de la subrasante. El límite líquido experimenta una reducción progresiva desde 30.06% sin CCA hasta 27.45% con 6% de CCA, mientras que el límite plástico disminuye de 21.32% a 16.90%. Sin embargo, el índice de plasticidad muestra un comportamiento diferente, aumentando inicialmente de 8.74% a 10.82% con 4% de CCA, para luego estabilizarse en 10.55% con 6% de CCA. Estos cambios en los límites de Atterberg indican una modificación significativa en el comportamiento plástico del suelo, lo que sugiere una mejora en su trabajabilidad y estabilidad.

O.E.2. Sobre la incidencia de la ceniza de cascarilla de arroz en la densidad de campo y ensayo de Proctor modificado:

La incorporación de CCA produce un efecto positivo notable en las propiedades de compactación del suelo. La densidad seca máxima aumenta significativamente de 1.82 g/cm³ sin CCA a 1.93 g/cm³ con 2% de CCA, manteniéndose luego relativamente estable hasta el 6% de adición. El contenido de humedad óptimo muestra un incremento progresivo desde 9.08% hasta 11.77% con 6% de CCA. La estabilización de la densidad después del 2% de CCA sugiere que este porcentaje podría ser el óptimo para la estabilización del suelo desde el punto de

vista de la compactación, mientras que el incremento continuo en el contenido de humedad óptimo indica una mayor capacidad de retención de agua del material estabilizado.

O.E.3. Sobre la capacidad de soporte de la subrasante con adición de ceniza de cascarilla de arroz:

La adición de CCA mejora significativamente la capacidad de soporte del suelo de la subrasante. El CBR al 100% de compactación aumenta de 11.74% sin CCA hasta 15.47% con 6% de CCA, representando un incremento del 31.77%. De manera similar, el CBR al 95% de compactación se incrementa de 7.22% a 12.17%, mostrando una mejora del 68.56%. Este aumento en los valores de CBR indica una mejora sustancial en la capacidad portante del suelo, lo que se traduce en una subrasante más resistente y estable. La mejora más significativa se observa con la adición inicial de 2% de CCA, sugiriendo que este porcentaje podría ser económicamente óptimo para la estabilización.

La adición de CCA demuestra ser una alternativa efectiva para la estabilización de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja-Jangas. Los resultados indican mejoras significativas en todas las propiedades geotécnicas evaluadas, con un porcentaje óptimo de adición alrededor del 2% de CCA, donde se observan los cambios más significativos. Este método de estabilización aparte de mejorar las propiedades de la subrasante, también representa una solución sostenible al utilizar un residuo agroindustrial. La mejora en la capacidad de soporte y las propiedades de compactación sugiere que la vida útil y el desempeño de la trocha carrozable se verán incrementados significativamente con esta intervención.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar ensayos adicionales para evaluar el comportamiento de los límites de consistencia con porcentajes intermedios de CCA (entre 0% y 2%), ya que en este rango se observaron los cambios más significativos. Esto permitiría determinar con mayor precisión el punto óptimo de modificación de la plasticidad del suelo.

Es importante realizar un control riguroso del proceso de obtención y preparación de la ceniza de cascarilla de arroz, estandarizando la temperatura y tiempo de calcinación, ya que estas variables pueden afectar significativamente las propiedades puzolánicas del material y su efecto sobre los límites de Atterberg.

Se sugiere realizar estudios complementarios sobre la durabilidad de la estabilización y su comportamiento frente a ciclos de humedecimiento y secado, especialmente considerando las condiciones climáticas específicas de la zona de Huanja-Jangas.

Para futuros proyectos de estabilización, se recomienda concentrarse en dosificaciones cercanas al 2% de CCA, ya que los resultados muestran que este porcentaje proporciona la mejor relación costo-beneficio en términos de mejora de la densidad.

Se sugiere implementar un protocolo estricto de control de compactación en campo, considerando el incremento observado en el contenido óptimo de humedad con la adición de CCA.

Es recomendable realizar estudios adicionales sobre el efecto de la energía de compactación en la densificación de mezclas suelo-CCA, considerando diferentes métodos de compactación que podrían ser más eficientes en campo.

Recomendaciones sobre la capacidad de soporte:

Se recomienda realizar ensayos de CBR en condiciones sumergidas para evaluar el comportamiento del suelo estabilizado bajo condiciones críticas de saturación, especialmente considerando las condiciones climáticas de la zona.

Es aconsejable poder realizar un programa en el cual se puedan realizar monitoreos a largo plazo para evaluar como se desempeña la subrasante que a sido estabilizada bajo condiciones reales de tráfico y clima.

Se sugiere realizar estudios complementarios sobre la resistencia a la erosión y el comportamiento ante cargas cíclicas de la subrasante estabilizada.

Capítulo VII: Referencias

Fuentes Documentales

Chauvet y Albertone, (2020). Transporte de carretera en América Latina: evolución de la infraestructura y de sus impactos entre 2007 y 2015. Boletín FAL, Edición 367, número 7, 2020. Editorial CEPAL.

Ciriaco F. Y Villalaz A., (2021). Análisis De La Capacidad De Soporte Del Suelo Arcilloso Agregando Ceniza De Madera A Nivel Del Subrasante, Carabayllo 2021. Tesis Para Obtener El Título Profesional De Ingeniero Civil. Facultad De Ingeniería Y Arquitectura, Escuela Profesional De Ingeniería Civil, Universidad César Vallejo.

Eduardo, Maritza y Rojas, (2020). Estabilización De Afirmado Con Ceniza Proveniente De Desechos De Cascarilla De Café Para Aplicar En Suelos De Construcción De Vías. Universidad Cooperativa De Colombia, Facultad De Ingeniería Civil.

Fuentes bibliográficas

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2003). *Standard method of test for California bearing ratio* (AASHTO T 193-99). AASHTO.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2009). *Standard method of test for California bearing ratio of laboratory compacted soils* (ASTM D1883-07). AASHTO.

Andaluz, L. (2022). Estudio del efecto de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades físico-mecánicas en suelos finos de subrasante [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato].

Araujo, N. (2014). *Ecuaciones de correlación del CBR con propiedades índice de suelos para la ciudad de Piura* [Tesis de grado, Universidad de Piura].

- ASTM International. (2009). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort 12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN·m/m³) (ASTM D698). *ASTM Annual Book of ASTM Standards* (Vol. 4.08, pp. 836-842).
- Barragán, G., & Cuervo, C. (2019). *Análisis del comportamiento físico mecánico de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% de la variedad blanco a un suelo areno arcilloso* [Tesis de grado, Universidad Piloto de Colombia]
- Burgos, B., & Hernandez, P. (2009). Guía para la intervención del espacio público en la ciudad de Cartagena de Indias [Tesis de grado, Universidad de Cartagena].
- Cárdenas, P., & Donoso, M. (2008). Proposición de una metodología particular para obtener la capacidad de soporte para suelos granulares sin curva Proctor definida [Tesis de grado, Universidad de Magallanes].
- Carrasco, L. (2022). Estabilización de la subrasante adicionando ceniza de cáscara de arroz en diseño del pavimento rígido en pampas de hospital, 2022 [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].
- Chayña, P. (2022). Análisis del uso de ceniza de totora en la estabilización de la subrasante en la trocha carrozable Ccota-Quipata, Puno, 2022 [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].
- Cristobal, F., & Quinte, M. (2022). Estabilización de subrasante con cenizas de eucalipto, paraje turístico Piedra Parada, Concepción, Junín 2021 [Tesis de grado, Universidad Continental].
- Hernández Méndez, C., & Pérez Quemba, W. Y. (2022). Evaluación del comportamiento de terreno natural con adiciones de escoria de acería de Gerdau Diaco como capa de mejoramiento de la sub-rasante en el suelo de Nemocón [Tesis de grado, Universidad Santo Tomás].

- Krishnarao, R. V., Subrahmanyam, J., & Kumar, T. J. (2001). Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. *Journal of the European Ceramic Society*, 21(1), 99-104.
- Loaiza, R., Correa, R., & Gomez, C. (2022). Mejoramiento de subrasante con ceniza de bagazo de caña en el tramo de la vía Totumo Martinica [Tesis de grado, Universidad Cooperativa de Colombia].
- López, B. (2021). *Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba – departamento de San Martín* [Tesis de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].
- Munera Miranda, J. C., & Aguiar Moya, J. P. (2019). Estimación del módulo resiliente para materiales granulares de Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 21(37), 12-20. <https://dx.doi.org/10.15517/iv.v21i37.42614>
- Neussner, E. (2001). Primer Simposio Internacional Sobre Estabilizacion De Explanadas Y Reciclado In Situ De Firmes Con Cemento. Volumen 1. La Importancia De Los Procesos De Estabilización. Historia Y Practica Actual En Alemania.
- Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2017, 28 de noviembre). Ceniza - Qué es, definición y concepto. Definiciones. <https://definicion.de/ceniza/>
- Quijano, C., & Valdivia, S. (2021). Estabilización de subrasante adicionando ceniza de carbón y tusa de maíz en trocha carrozable Lomaspata - Coracora, distrito Coracora, Ayacucho – 2021 [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].
- Quispe, C. (2020). Estabilización de subrasante de vías en suelos expansivos con cloruro de sodio - Avenida Jacinto Ibarra, distrito de Chilca - Huancayo 2020 [Tesis de grado, Universidad Continental].

- Sánchez, F. (2012, abril). Conceptos y aplicaciones de la tecnología Ramcones en suelos y mezclas asfálticas. Tres formas de diseñar un suelo compactado, ventajas y desventajas. *Blogramcodes*.
- Sierra, H., Chinchilla, B., & Galindo, S. (2019). Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de la subrasante de la cantera La Caima, estabilizada con ceniza de bagazo de caña de azúcar y cemento hidráulico [Tesis de grado, Universidad Cooperativa de Colombia].
- Vargas, J., Alvarado, P., Vega-Baudrit, J., & Porras, M. (2013). Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Fuentes electrónicas

- Vargas Cordero, Z. R. (2009). La investigación aplicada: Una forma de conocer las realidades con evidencia científica. *Revista Educación*, 33(1), 155-165.

Anexos

Anexo 1: Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE	DIMENSIONES	METODOLOGÍA
<p>Problema General</p> <p>¿Qué efecto tiene la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja-Jangas –Huaraz – Ancash- 2023?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Determinar qué efecto tiene la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja-Jangas–Huaraz–Ancash- 2023.</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>La adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% influye favorablemente en la estabilización de la subrasante mejorando así sus propiedades físicas y mecánicas en la trocha carrozable de Huanja- Jangas – Huaraz –Ancash- 2023.</p>	<p>Variable 1</p> <p>Estabilización de la subrasante</p>	<p>Límites de consistencia de Atterberg.</p> <p>Proctor Modificado</p> <p>Capacidad de Soporte California (CBR)</p> <p>Dosificación</p>	<p>Tipo de Investigación:</p> <p>Investigación Aplicada</p> <p>Diseño de Investigación:</p> <p>Cuasi - Experimental</p> <p>Enfoque:</p> <p>Cuantitativa</p>

Problema Específico	Objetivo Específico	Hipótesis Especificaciones	Variable 2	Muestra:
<p>¿Cómo incide la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en los límites de consistencia de atterberg de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023?</p> <p>¿Cómo incide la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en su ensayo de Proctor modificado de la subrasante en la trocha</p>	<p>Determinar qué efecto tiene la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en los límites de consistencia de atterberg de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.</p> <p>Determinar la incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% en el ensayo de Proctor</p>	<p>La adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% influye favorablemente en los límites de consistencia de atterberg de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.</p> <p>La adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% influye favorablemente en el ensayo de Proctor modificado de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.</p>	<p>Ceniza de Cascarilla de Arroz</p>	<p>12 especímenes de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.</p>

<p>carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz – Ancash- 2023?</p> <p>¿Cómo incide la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2% 4% y 6% en el análisis de la capacidad de soporte de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz – Ancash- 2023, adicionando ceniza de cascarilla de arroz?</p>	<p>modificado de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz – Ancash- 2023.</p> <p>Evaluar la incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2% 4% y 6% en la capacidad de soporte de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz – Ancash- 2023, adicionando ceniza de cascarilla de arroz.</p>	<p>La adición de ceniza de cascarilla de arroz en 2%, 4% y 6% influye favorablemente en la capacidad de soporte de la subrasante en la trocha carrozable de Huanja- Jangas –Huaraz –Ancash- 2023.</p>			
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--

Anexo 2: Panel Fotográfico



FOTOGRAFIA N°01: CALICATA N°01
Excavación de la calicata N°01 para el proyecto de tesis.



FOTOGRAFIA N°02: CALICATA N°02
Excavación de la calicata N°02 para el proyecto de tesis.



FOTOGRAFIA N°03: CALICATA N°03
Excavación de la calicata N°03 para el proyecto de tesis.



FOTOGRAFIA N°04: QUEMADO DE CASCARILLA DE ARROZ
Inicio de la calcinación de la cascarilla de arroz la cual estuvo seca completamente para el proyecto de tesis.



FOTOGRAFIA N°05: CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ
Evidencia de la calcinación controlada de la cascarilla de arroz para el proyecto de tesis.



FOTOGRAFIA N°06: PESADO DE MUESTRA
Se realizó el pesado de las muestras extraídas de las calicatas junto al técnico del laboratorio.



FOTOGRAFIA N°07: ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD
Se realizó el ensayo de contenido de humedad de las muestras base extraídas de las calicatas.



FOTOGRAFIA N°08: ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
Se realizó el ensayo de análisis granulométrico de la muestra base extraída de la calicata.



FOTOGRAFIA N°09: ENSAYO DE ANALISIS GRANULOMETRICO AÑADIENDO 2% CCA
Se realizó el ensayo de análisis granulométrico de la muestra añadiéndole 2% de ceniza de cascarilla de arroz.



FOTOGRAFIA N°10: ENSAYO DE ANALISIS GRANULOMETRICO AÑADIENDO 4% CCA
Se realizó el ensayo de análisis granulométrico de la muestra añadiéndole 4% de ceniza de cascarilla de arroz.



**FOTOGRAFIA N°11: ENSAYO DE ANALISIS GRANULOMETRICO
AÑADIENDO 6% CCA**

Se realizó el ensayo de análisis granulométrico de la muestra añadiéndole 6% de ceniza de cascarilla de arroz.



FOTOGRAFIA N°12: ENSAYO DE LIMITE LIQUIDO (BASE)

Se realizó el ensayo de limite liquido de las muestras base extraídas de las calicatas.



FOTOGRAFIA N°13: ENSAYO DE LIMITE LIQUIDO AÑADIENDOLE 2% CCA
Se realizó el ensayo de limite liquido de la muestra añadiéndole 2% de ceniza de cascarilla de arroz.



FOTOGRAFIA N°14: ENSAYO DE LIMITE LIQUIDO AÑADIENDOLE 4% CCA
Se realizó el ensayo de limite liquido de la muestra añadiéndole 4% de ceniza de cascarilla de arroz.



FOTOGRAFIA N°15: ENSAYO DE LIMITE LIQUIDO AÑADIENDOLE 6% CCA
Se realizó el ensayo de limite liquido de la muestra añadiéndole 6% de ceniza de cascarilla de arroz.



FOTOGRAFIA N°16: ENSAYO DE LIMITE PLASTICO (BASE)
Se realizó el ensayo de limite plástico de la muestra extraída de la calicata.



FOTOGRAFIA N°17: ENSAYO DE LIMITE PLASTICO AÑADIENDOLE 2% CCA
Se realizó el ensayo de limite plástico de la muestra añadiéndole 2% de ceniza de cascarilla de arroz.



FOTOGRAFIA N°18: ENSAYO DE LIMITE PLASTICO AÑADIENDOLE 4% CCA
Se realizó el ensayo de limite plástico de la muestra añadiéndole 4% de ceniza de cascarilla de arroz.



FOTOGRAFIA N°19: ENSAYO DE LIMITE PLASTICO AÑADIENDOLE 6% CCA
Se realizó el ensayo de limite plástico de la muestra añadiéndole 6% de ceniza de cascarilla de arroz.



FOTOGRAFIA N°20: ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (BASE)
Se realizó el ensayo de proctor modificado de las muestras base extraídas de las calicatas.



**FOTOGRAFIA N°21: ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO
AÑADIENDOLE 2% CCA**

Se realizó el ensayo de proctor modificado de la muestra añadiéndole 2% de ceniza de cascarilla de arroz.



**FOTOGRAFIA N°22: ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO
AÑADIENDOLE 4% CCA**

Se realizó el ensayo de proctor modificado de la muestra añadiéndole 4% de ceniza de cascarilla de arroz.



FOTOGRAFIA N°23: ENSAYO DE LIMITE LIQUIDO AÑADIENDOLE 6% CCA
Se realizó el ensayo de Proctor modificado de la muestra añadiéndole 6% de ceniza de cascarilla de arroz.