

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



TESIS

**CENIZA DE CARBÓN VEGETAL EN LA ESTABILIZACIÓN
DE SUELOS ARCILLOSOS APLICADO A SUBRASANTES,
PROVINCIA PADRE ABAD – UCAYALI, EN EL 2020**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. ALIAGA CAJA, Edwin Luis

ASESOR:

Mg. MONTALVÁN SALCEDO, Dayana Mary

Línea de investigación institucional: Transporte y urbanismo

Huancayo – Perú

2023

FALSA PORTADA

Mg. Dayana Mary, MONTALVÁN SALCEDO

Asesor

DEDICATORIA

A Dios por su Bendición.

A mis padres, Bendición divina

A mis hijos, por ser mi fuente de
superación.

Bach. ALIAGA CAJA, Edwin Luis

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque es mi fuente de fuerza y nunca me ha dejado solo en los momentos más cruciales de mi vida.

A los docentes de la Universidad Peruana Los Andes, por impartir sus conocimientos durante mi formación profesional.

A mi padre, que desde lo alto derrama sus bendiciones y jamás me dejó solo.

Bach. ALIAGA CAJA, Edwin Luis



UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

EL DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA DEJA:

CONSTANCIA N° 352

Que, el (la) bachiller: Bachilleres, Bachiller, **EDWIN LUIS, ALIAGA CAJA**, de la Escuela Profesional de **INGENIERÍA CIVIL**, presentó la tesis denominada denominado: **“CENIZA DE CARBÓN VEGETAL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS APLICADO A SUBRASANTES, PROVINCIA PADRE ABAD – UCAYALI, EN EL 2020**, la misma que cuenta con **152 Páginas**, ha sido ingresada por el **SOFTWARE – TURNITIN FEEDBACK STUDIO** obteniendo el **28%** de similitud.

Se expide la presente constancia para los fines pertinentes.

Huancayo 17 de Noviembre del 2022



Dr. Santiago Zevallos Salinas
Director de la Unidad de Investigación

HOJA DE CONFORMIDAD DE LOS JURADOS

Dr. Rubén Darío Tapia Silguera.
DECANO DE LA FACULTAD

Ing. Nataly Lucia Córdova Zorrilla.
JURADO

Ing. Lidia Benigna Larrazábal Sánchez.
JURADO

Ing. Faustino Aníbal Gutiérrez Dañobeitia.
JURADO

CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
HOJA DE CONFORMIDAD JURADO	¡Error! Marcador no definido.
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN	XVI
CAPÍTULO I	18
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	18
1.1. Planteamiento del problema.....	18
1.2. Formulación del problema	21
1.2.1. Problema general.....	21
1.2.2. Problemas específicos	21
1.3. Justificación	22
1.3.1. Justificación social	22
1.3.2. Justificación teórica.....	22
1.3.3. Justificación metodológica.....	23
1.4. Objetivos	23
1.4.1. Objetivo general	23
1.4.2. Objetivos específicos.....	24
CAPÍTULO II	25
MARCO TEÓRICO	25
2.1. Antecedentes	25
2.1.1. Internacional.....	25
2.1.2. Nacional	30
2.2. Bases teóricas.....	34

2.2.1. Ceniza de carbón vegetal.....	35
2.2.2. Estabilización de suelos	37
2.2.3. Estabilización de suelos arcillosos	39
2.2.4. Ensayos de laboratorio	45
2.3. Definición de términos básicos	68
2.4. Hipótesis	70
2.4.1. Hipótesis general	70
2.4.2. Hipótesis específicas	70
2.5. Variables	71
2.5.1. Definición conceptual	71
2.5.2. Definición operacional	72
CAPÍTULO III	74
METODOLOGÍA	74
3.1. Método de investigación	74
3.2. Tipo de investigación.....	74
3.3. Nivel de investigación	75
3.4. Diseño de investigación	76
3.5. Población y muestra.....	76
3.5.1. Población.....	76
3.5.2. Muestra.....	77
3.6. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	78
3.7. Validación de los instrumentos de recolección de datos	79
3.7.1. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	79
3.8. Procedimiento de ensayos.....	79
3.8.1. Recojo de material en campo	79
3.8.2. Análisis granulométrico	82
3.8.3. Humedad natural	83
3.8.4. Índice de plasticidad.....	83
3.8.5. Máxima densidad seca y óptimo contenido humedad.....	84
3.8.6. Capacidad de resistencia de soporte.....	84
CAPÍTULO IV	87
RESULTADOS	87
4.1. Presentación de resultados	87

4.1.1. Adición de ceniza de carbón vegetal en el tipo de suelo arcilloso.....	87
4.1.2. Adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural del suelo arcilloso.....	94
4.1.3. Adición de ceniza de carbón vegetal en el índice de plasticidad del suelo arcilloso.....	95
4.1.4. Adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad del suelo arcilloso.....	97
4.1.5. Adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de soporte del suelo arcilloso.....	100
4.2. Prueba de hipótesis	104
4.2.1. Adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural del suelo arcilloso.....	104
4.2.2. Adición de ceniza de carbón vegetal en el índice de plasticidad del suelo arcilloso.....	108
4.2.3. Adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad del suelo arcilloso.....	113
4.2.4. Adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de soporte del suelo arcilloso.....	118
CAPÍTULO V	124
DISCUSIÓN	124
5.1. Discusión de resultados	124
5.1.1. Adición de ceniza de carbón vegetal en el tipo de suelo arcilloso.....	124
5.1.2. Adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural del suelo arcilloso.....	128
5.1.3. Adición de ceniza de carbón vegetal en el índice de plasticidad del suelo arcilloso.....	130
5.1.4. Adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca del suelo arcilloso.....	132
5.1.5. Adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de resistencia del suelo arcilloso.....	137
CONCLUSIONES	141
RECOMENDACIONES	143
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
ANEXOS	150

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Índice de plasticidad del suelo.....	40
Tabla 2. Clasificación de suelos según tamaño de partículas.....	45
Tabla 3. Tamices de malla cuadrada	48
Tabla 4. Serie de tamices alternativos	49
Tabla 5. Peso de la muestra según partículas grandes.....	49
Tabla 6. Cantidad de material para contenido de humedad.....	52
Tabla 7. Clasificación del suelo según índice de plasticidad	58
Tabla 8. Categorías de subrasante	63
Tabla 9. Lecturas de penetración.....	67
Tabla 5. Operacionalización de variables.....	73
Tabla 11. Tratamiento de muestras.....	78
Tabla 12. Serie de tamices de abertura cuadrada.....	82
Tabla 13. Resumen de granulometría – suelo 100% - Calicata 1.....	87
Tabla 14. Resumen de granulometría – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 1.....	87
Tabla 15. Resumen de granulometría – suelo 75% + CCV 25% - Calicata 1.....	88
Tabla 16. Resumen de granulometría – suelo 70% + CCV 30%- Calicata 1.....	89
Tabla 17. Resumen de granulometría – suelo 100% - Calicata 2.....	89
Tabla 18. Resumen de granulometría – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 2.....	90
Tabla 19. Resumen de granulometría – suelo 75% + CCV 25% - Calicata 2.....	90
Tabla 20. Resumen de granulometría – suelo 70% + CCV 30%- Calicata 2.....	91
Tabla 21. Resumen de granulometría – suelo 100% - Calicata 3.....	92
Tabla 22. Resumen de granulometría – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 3.....	92
Tabla 23. Resumen de granulometría – suelo 75% + CCV 25% - Calicata 3.....	93
Tabla 24. Resumen de granulometría – suelo 70% + CCV 30%- Calicata 3.....	93
Tabla 25. Índice de plasticidad - Calicata 1.....	95
Tabla 26. Índice de plasticidad - Calicata 2.....	96
Tabla 27. Índice de plasticidad - Calicata 3.....	97
Tabla 28. CBR al 95% de la MDS - Calicata 1.....	101

Tabla 29. CBR al 100% de la MDS - Calicata 1	101
Tabla 30. Diseño de bloques completamente al azar – Humedad natural	105
Tabla 31. Análisis de varianza – Humedad natural	106
Tabla 32. Prueba de Tukey – Bloques – Humedad natural	107
Tabla 33. Prueba de Tukey – Tratamientos – Humedad natural	108
Tabla 34. Diseño de bloques completamente al azar – Índice de plasticidad	109
Tabla 35. Análisis de varianza – Índice plasticidad	111
Tabla 36. Prueba de Tukey – Bloques – Índice de plasticidad.....	111
Tabla 37. Prueba de Tukey – Tratamientos – Índice de plasticidad.....	112
Tabla 38. Diseño de bloques completamente al azar – Máxima densidad seca del suelo. .	113
Tabla 39. Análisis de varianza – Máxima densidad seca del suelo.....	115
Tabla 40. Prueba de Tukey – Bloques – Máxima densidad seca del suelo	116
Tabla 41. Prueba de Tukey – Tratamientos – Máxima densidad seca del suelo	117
Tabla 42. Diseño de bloques completamente al azar – Capacidad de resistencia del suelo	118
Tabla 43. Análisis de varianza – Capacidad de resistencia del suelo.....	120
Tabla 44. Prueba de Tukey – Bloques – Capacidad de resistencia del suelo	121
Tabla 45. Prueba de Tukey – Tratamientos – Capacidad de resistencia del suelo	122

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de estabilización de suelos	39
Figura 2. Minerales de arcilla	42
Figura 3. Clasificación de suelos – SUCS	46
Figura 4. Clasificación de suelos – AASHTO	47
Figura 5. Mishiyacu – La Piedra – Alexander Von Humbolth – Padre Abad - Ucayali	78
Figura 6. Recojo de material en el camino vecinal Mishiyacu – La Piedra, calicata 1	80
Figura 7. Recojo de material en el camino vecinal Mishiyacu – La Piedra, calicata 2	81
Figura 8. Recojo de material en el camino vecinal Mishiyacu – La Piedra, calicata 3	82
Figura 9. Curva granulométrica – suelo 100% - Calicata 1	87
Figura 10. Curva granulométrica – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 1	88
Figura 11. Curva granulométrica – suelo 75% + CCV 25% - Calicata 1	88
Figura 12. Curva granulométrica – suelo 70% + CCV 30% - Calicata 1	89
Figura 13. Curva granulométrica – suelo 100% - Calicata 2	90
Figura 14. Curva granulométrica – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 2	90
Figura 15. Curva granulométrica – suelo 75% + CCV 25% - Calicata 2	91
Figura 16. Curva granulométrica – suelo 70% + CCV 30% - Calicata 2	91
Figura 17. Curva granulométrica – suelo 100% - Calicata 3	92
Figura 18. Curva granulométrica – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 3	92
Figura 19. Curva granulométrica – suelo 75% + CCV 25% - Calicata 3	93
Figura 20. Curva granulométrica – suelo 70% + CCV 30% - Calicata 3	93
Figura 21. Contenido de humedad natural - Calicata 1	94
Figura 22. Contenido de humedad natural - Calicata 2	94
Figura 23. Contenido de humedad natural - Calicata 3	95
Figura 24. Índice de plasticidad – Calicata 1	96
Figura 25. Índice de plasticidad – Calicata 2	96
Figura 26. Índice de plasticidad – Calicata 3	97
Figura 27. Máxima densidad seca – Calicata 1	98
Figura 28. Óptimo contenido de humedad – Calicata 1	98
Figura 29. Máxima densidad seca – Calicata 2	99

Figura 30. Óptimo contenido de humedad – Calicata 2	99
Figura 31. Máxima densidad seca – Calicata 3	100
Figura 32. Óptimo contenido de humedad – Calicata 3	100
Figura 33. CBR al 95% de la MDS – Calicata 1	101
Figura 34. CBR al 100% de la MDS – Calicata 1	102
Figura 35. CBR al 95% de la MDS – Calicata 2	102
Figura 36. CBR al 100% de la MDS – Calicata 2	103
Figura 37. CBR al 95% de la MDS – Calicata 3	103
Figura 38. CBR al 100% de la MDS – Calicata 3	104

RESUMEN

La investigación tuvo como problema general: ¿De qué manera influye la adición de ceniza de carbón vegetal en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020?; el objetivo general fue: Determinar la influencia de la adición de ceniza de carbón vegetal en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020; la hipótesis general que se contrastó fue: La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020. El método de investigación fue científico, de tipo aplicada, con nivel explicativo, correspondiente al diseño experimental. La población estuvo compuesta por los suelos arcillosos de las carreteras del departamento de Ucayali y la muestra estuvo delimitada por 2 Km de la carretera no pavimentada del camino vecinal Mishiyacu – La piedra, distrito Alexander Von Humbolth, provincia Padre Abad, departamento Ucayali. Los resultados demostraron que la adición de ceniza de carbón incrementa el CBR al 95% de la máxima densidad seca del suelo natural de 3.00%; 3.10% y 2.60% a 37.60%; 37.50% y 38.60% con 30% de ceniza de carbón para las calicatas 1; 2 y 3 respectivamente. Se llegó a la conclusión de que, la adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes; ya que la ceniza de carbón vegetal incrementa el valor del CBR del suelo y lo convierte en una subrasante excelente según la categoría de subrasantes del MTC.

Palabras clave: Carretera, ceniza de carbón vegetal, estabilización de suelos, suelo arcilloso.

ABSTRACT

The general problem of the research was: How does the addition of charcoal ash influence the stabilization of clayey soils applied to subgrades in the province of Padre Abad - Ucayali, in 2020? The general objective was: To determine the influence of the addition of charcoal ash in the stabilization of clayey soils applied to subgrades in the province Padre Abad - Ucayali, in 2020; the general hypothesis that was contrasted was: The addition of charcoal ash significantly influences the stabilization of clayey soils applied to subgrades in the province Padre Abad - Ucayali, in 2020. The research method was scientific, of applied type, with explanatory level, corresponding to the experimental design. The population was composed of the clayey soils of the roads of the department of Ucayali and the sample was delimited by 2 km of the unpaved road of the Mishiyacu - La piedra neighborhood road, Alexander Von Humbolth district, Padre Abad province, department of Ucayali. The results showed that the addition of coal ash increases the CBR at 95% of the maximum dry density of the natural soil from 3.00%; 3.10% and 2.60% to 37.60%; 37.50% and 38.60% with 30% coal ash for pits 1; 2 and 3 respectively. It was concluded that, the addition of charcoal ash significantly influences the stabilization of clayey soils applied to subgrades; since charcoal ash increases the CBR value of the soil and makes it an excellent subgrade according to the MTC subgrade category.

Keywords: Road, charcoal ash, soil stabilization, clay soil.

INTRODUCCIÓN

La tesis titulada: Adición de ceniza de ceniza de carbón vegetal en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, parte de la problemática de que la superficie de rodadura a nivel de afirmado y la capa de rodadura no se encuentran en buenas condiciones debido a la falta de atención desde hace 4 años, además de que en las localidades de la provincia Padre de Abad, hay producción de carbón vegetal que genera residuos conocidos como cenizas de carbón, los cuales se desechan en centros de acopio que contaminan áreas naturales; no obstante estudios demostraron que estas cenizas tienen la capacidad de estabilizar suelos. El objetivo general del estudio era evaluar el efecto de la adición de cenizas de carbón vegetal en la estabilidad de los suelos arcillosos del subsuelo. Para el cual, se desarrollaron ensayos de laboratorio con la muestra de suelo arcilloso obtenida del camino vecinal Mishiyacu – La Piedra – Alexander Van Humbolth, Provincia Padre de Abad, Departamento de Ucayali y la adición de ceniza de carbón vegetal en proporciones de 20%, 25% y 30% respecto al peso del suelo, para establecer qué porcentaje da las cualidades óptimas para estabilizar un suelo arcilloso y cumplir las normas de una subrasante según el manual del Ministerio de Transportes y Comunicaciones sobre suelos, pavimentos y hormigón. En el laboratorio, se realizan pruebas para evaluar el análisis granulométrico, el contenido de humedad, los límites de Atterberg, el proctor modificado y el CBR.

El capítulo I, esta declaración amplía el planteamiento del problema presentando la cuestión como una pregunta, describiendo los objetivos para lograr una solución y apoyando su importancia en un contexto social, teórico y metodológico.

El capítulo II El marco teórico, en el que la investigación se apoya en estudios previos realizados dentro y fuera del país, así como el fundamento teórico y los términos básicos

para la comprensión de la investigación; paralelamente, se presenta la hipótesis como posible solución al problema, junto con las variables conceptuales.

El capítulo III, trata sobre la metodología de la investigación, haciendo hincapié en el método, el tipo, el nivel y el diseño de la investigación, así como en la población y la muestra del estudio, los métodos y el equipo de recogida de datos y el proceso de investigación.

En el capítulo IV, se muestran los resultados se presentan de acuerdo con los objetivos precisos que hacen viable el propósito general de la investigación.

En el capítulo V, se describen los hallazgos recogidos, junto con la investigación que sirvió de base para el crecimiento de la indagación, con lo que se obtiene una nueva contribución para los esfuerzos futuros.

Finalmente, se presentan las conclusiones, las sugerencias, las referencias bibliográficas y el apéndice que incluye la matriz de consistencia y las hojas de pruebas de laboratorio.

Bach. ALIAGA CAJA, Edwin Luis.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La inestabilidad de suelos es uno de los problemas más comunes de las carreteras no pavimentadas, ya que no tienen la capacidad de soportar cargas de tránsito (GUTIÉRREZ, 2010). Por lo cual es necesario el reemplazo de suelos por otro con mejores propiedades o la estabilización con material de canteras cercanas que muchas veces no logran satisfacer los requerimientos por lo que opta por emplear estabilizantes industriales y naturales que no sean tóxicos para el medio ambiente. Siendo uno de los productos naturales las cenizas de carbón que provienen del proceso de combustión y se les conoce como ceniza vegetal (PÉREZ, y otros, 2008).

Alrededor del mundo existen millones kilómetros de carreteras sin pavimentar, los cuales son manejadas por una variedad de autoridades nacionales, estatales, locales y

entidades privadas. Ya que las carreteras constituyen el primer tipo de transporte a nivel mundial, además de ser fundamental para el desarrollo económico y para el desarrollo de las actividades cotidianas. Razón por la cual se debe gestionar las carreteras no pavimentadas con la finalidad de mejorar su calidad actual y a futuro para satisfacer las necesidades de la sociedad (GUTIÉRREZ, 2017). Así mismo se debe mencionar que “la mayoría de las carreteras presentan problemas de estabilidad de subrasante debido al tipo de material y condiciones en las que se encuentra el suelo de la carretera” (DÍAZ, 2018). Es así que “Cada año, la escasa resistencia del suelo provoca daños por valor de miles de millones de dólares en edificios y otras estructuras de todo el mundo” (Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión), 2020).

En Latinoamérica, Colombia que es un país que se encuentra en desarrollo y donde el principal medio de transporte es por carretera, la necesidad de infraestructura vial va en aumento demandando materiales de calidad que son difíciles de conseguir, por lo cual surgieron alternativas constructivas de estabilización con diversos agentes estabilizantes como cal, cemento, asfalto, cenizas, lodos aceitosos, entre otros (Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitosos, 2020). Así mismo en México, Venezuela y Colombia, los suelos arcillosos o suelos con materiales finos no cumplen con los requisitos para soportar cargas vehiculares debido a la baja resistencia del suelo (QUINTERO, y otros, 2015).

Debido a que estas carreteras atraviesan principalmente la sierra, que es propensa a los deslizamientos y derrumbes debido a la inestabilidad de las laderas, las altas pendientes y las montañas escarpadas, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú ha determinado que las carreteras más afectadas son las transversales y otras (camino departamentales y vecinales), con aproximadamente el 13% y el 40%, respectivamente. Esto se debe a que estas carreteras atraviesan principalmente la sierra. Además, se encuentran en

lugares propensos a la inestabilidad por la litología, el tipo de suelo, las planicies mal drenadas o las terrazas de inundación en las que se encuentran. (Ministerio del Ambiente, 2011)

Uno de los aspectos más significativos que contribuyen al desarrollo económico y social de una población es la construcción de nuevas carreteras. Para ello, conectan a las poblaciones rurales con el resto de la región y el país en su conjunto; transportan a los turistas a los centros arqueológicos y/o turísticos; transportan la producción inicial de los centros con potencial económico (zonas mineras, agrícolas o ganaderas) a las redes pavimentadas; e incluso garantizan el acceso a sectores con un alto nivel de valor estratégico. Todo ello se consigue mediante la construcción de carreteras y otras formas de transporte (zonas fronterizas). Por ello, es de máxima necesidad mantener su transitabilidad en condiciones al menos mínimamente aceptables durante el mayor tiempo que sea factible. Periódicamente, las autoridades viales llevan a cabo los típicos procedimientos de mantenimiento consistentes en el reperfilado, humedecimiento y compactación de la carretera con este fin. La realización de estos trabajos tradicionales requiere importantes inversiones en equipos, mano de obra y materiales, sobre todo cuando la red sin pavimentar es amplia.

En el departamento de Ucayali, provincia de Padre Abad, distrito de Alexander Von Humbolth, la carretera que permite mantener comunicado a la localidad de Piedras y Mishiyacu, dicha carretera presenta una superficie de rodadura a nivel de afirmado con subrasante y capa de rodadura que no se encuentran en buenas condiciones debido a la falta de atención desde hace 4 años. El problema del afirmado es la inestabilidad en épocas de lluvia impidiendo el tránsito normal de los vehículos debido a la formación de baches y abultamientos en el afirmado a causa de las lluvias y las horas de sol sobre el afirmado. Por ello, el objetivo de esta investigación es encontrar una solución a este problema intentando

estabilizar el suelo de una carretera sin pavimentar mediante la adición de cenizas de carbón vegetal en proporciones variables. Se espera que, una vez estabilizado el suelo, sea posible instalar una capa de rodadura en la carretera.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿De qué manera influye la adición de ceniza de carbón vegetal en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020?

1.2.2. Problemas específicos

1.2.2.1.-¿De qué manera afecta la adición de ceniza de carbón vegetal en la clasificación del suelo arcilloso aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020?

1.2.2.2.-¿De qué forma influye la adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020?

1.2.2.3.-¿De qué manera influye la adición de ceniza de carbón vegetal en la índice plasticidad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020?

1.2.2.4.-¿De qué manera altera la adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020?

1.2.2.5.-¿De qué forma afecta la adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación social

Según Bernal (2010), “la justificación social o práctica existe cuando el desarrollo de la investigación propone estrategias que al aplicarse pretenden contribuir al problema”.

La capacidad del suelo para soportar el peso será mejorada y aumentada como resultado de la adición de la ceniza de carbón, lo que conducirá al logro de la estabilización del suelo. En la carretera que une las localidades de La Piedra y Mishiyacu, esto permitirá lograr un flujo normal de tráfico vehicular, lo que beneficiará a los pobladores de ambas localidades al contar con una carretera en buen estado y garantizar la seguridad y comodidad de los pobladores al transitar en vehículo. De la misma manera, es esencial hacer hincapié en el flujo suficiente de tráfico comercial para impulsar el bienestar económico de las personas que utilizan la carretera y viven en las comunidades mencionadas.

1.3.2. Justificación teórica

Según Castro (2016), “La relevancia del análisis de un tema en la creación de una teoría científica se muestra mediante la justificación teórica, que también requiere una indicación de si el estudio dará lugar a una innovación en la práctica científica”.

Según lo expuesto en el párrafo anterior, la ceniza de carbón vegetal permite estabilizar el suelo potenciando su capacidad y resistencia para lograr un buen rendimiento en una carretera sin pavimentar. Esto puede lograrse añadiendo ceniza de carbón vegetal al suelo. Dado que la ceniza de carbón vegetal posee cualidades útiles para la neutralización de tierras ligeras y arcillosas, es posible utilizar la ceniza de carbón vegetal para estabilizar el suelo, mejorando su capacidad y resistencia, con el fin de obtener un buen rendimiento en

una carretera no pavimentada. Esto es posible gracias a que la ceniza de carbón vegetal está disponible.

1.3.3. Justificación metodológica

Según Bernal (2010), “Cuando el proyecto de investigación aporta un enfoque novedoso para el desarrollo de conocimientos válidos y fiables, entra en juego la descripción de los fundamentos metodológicos”.

En este escenario, se estabilizará el suelo añadiendo ceniza de carbón vegetal en proporciones del 7%, 14% y 21% con respecto al peso de la muestra de suelo para cada prueba particular. Se ha determinado qué proporción de ceniza logra una mejor estabilidad en el suelo que se está estudiando, por lo que ésta será la proporción de ceniza que se añadirá. De igual forma, es importante destacar que la formulación de los ensayos se realizó de acuerdo a las normas establecidas por la ASTM, AASHTO, NTP y MTC, tomando estas dos últimas como punto de referencia las dos primeras. Por otro lado, es importante señalar que esta investigación será un referente para próximas investigaciones que evalúen la estabilización de pisos con cenizas de carbón en esta región del país, como Madre de Dios, donde los suelos pueden tener características similares. Esto es algo que hay que resaltar porque es importante de notar. Es un punto importante que hay que tener en cuenta.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la adición de ceniza de carbón vegetal en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.

1.4.2. Objetivos específicos

- 1.4.2.1.-Evaluar de qué manera afecta la adición de ceniza de carbón vegetal en la clasificación del suelo arcilloso aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.
- 1.4.2.2.-Inferir la influencia de la adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.
- 1.4.2.3.-Evaluar la influencia de la adición de ceniza de carbón vegetal en el índice plasticidad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020?
- 1.4.2.4.-Determinar de qué manera altera la adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.
- 1.4.2.5.-Evaluar de qué forma afecta la adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacional

Según (MORALES, 2015) para optar el título de Ingeniero civil, el autor sustentó la tesis titulada “Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas”. Con el fin de determinar los materiales alternativos más eficaces para los esfuerzos de estabilización de la red terciaria. La metodología utilizada en el estudio fue de carácter experimental y de naturaleza científica. Se examinó la influencia de la ceniza en las proporciones del 7%, 14% y 21% en varios tipos

de suelos (arcilla, arena y material de carretera del municipio de Urrao) utilizando el ensayo Proctor modificado y el ensayo de resistencia a la compresión no confinada (UCS). En cuanto a los resultados del ensayo de Proctor modificado, para el suelo de Urrao con la adición de ceniza de carbón al 7%, se tuvo la máxima densidad seca de 14.75 kN/m^3 , 18.8 kN/m^3 para la arcilla con 0% de ceniza de carbón y 19.9 kN/m^3 para la arenilla con 0% e adición de ceniza de carbón. Llegó a la conclusión de que, para producir un material cementante con propiedades comparables a la norma colombiana INVIAS, la ceniza de carbón debe ser tamizada primero a través de un tamiz con un tamaño de malla de 100 o más, y se recomienda utilizar hidróxido de sodio como activador en forma de solución. Así se indica en la conclusión que presentó. Para conseguir el resultado deseado, se puso en marcha esta medida.

Según (CAÑAR, 2017) para la obtención del título de Ingeniero civil sustentó el trabajo experimental titulado “Análisis comparativo de la resistencia al corte y estabilización de suelos arenosos finos y arcillosos combinadas con cenizas de carbón”. Para lograr el objetivo de estabilizar dos suelos que tienen cualidades contrastantes, combinando con ellos una adición como la ceniza de carbón y determinando su capacidad portante y resistencia al corte mediante el uso de pruebas de laboratorio, se combinarán los dos suelos. La metodología utilizada en el estudio fue científica, con un esquema experimental. Para profundizar en el tema, el autor del trabajo realizó una misión de reconocimiento visual con el fin de ubicar con exactitud los suelos pertenecientes a los cantones de Ambato y Puyo y determinar la mejor forma de removerlos. Posteriormente, el autor realizó estudios en el laboratorio, algunos de los cuales incluyeron granulometría, límites de Atterberg, capacidad portante y Proctor modificado. Es fundamental señalar que en cada prueba se adaptaron las combinaciones para ajustarse a tres porcentajes de cenizas de carbón: 20%, 23% y 25%. En

cuanto a los resultados de la prueba CBR, se descubrió que los valores de soporte alcanzados tras la adición posterior de cenizas de carbón al suelo compuesto por arena limosa en las proporciones de 20%, 23% y 25%, respectivamente, fueron de 18,6%, 19,1% y 19,6%, respectivamente. Estos valores se alcanzaron tras la adición de cenizas de carbón. Esto ilustra que la adición de cenizas de carbón a este tipo particular de suelo mejora tanto los resultados como el comportamiento del suelo. En comparación, los valores de soporte resultaron ser del 9,8%, el 10,0% y el 11,20% en suelos compuestos por arcilla de alta plasticidad. Los resultados de su estudio le llevaron a la conclusión de que la forma más exitosa es combinar cenizas de carbón con suelos arenosos finos en una cantidad comparable al 25% del peso total del suelo. Además, descubrió que era ventajoso para los suelos expansivos como la arcilla, ya que la creación de una masa compacta aumentaba el grado de compactación y mejoraba el valor de soporte (CBR) y la resistencia al corte del suelo. Esto era así porque la masa compacta aumentaba el grado de compactación. Así se demostró.

Según (ARIZA, y otros, 2017) para optar el título de Ingeniero civil, sustentaron la tesis titulada “Evaluación de la capacidad de soporte (CBR) de un suelo expansivo con adición de ceniza volante”. El propósito de este estudio fue determinar la influencia, si es que hay alguna, que la incorporación de cenizas volantes a un suelo fino que carecía de estabilidad volumétrica en porcentajes del 30, 35 y 40 por ciento tenía sobre las propiedades mecánicas del suelo. La investigación se llevó a cabo haciendo uso de métodos científicos, y el método consistió en una metodología diseñada experimentalmente. Para avanzar en el estudio fue necesario determinar las características del material arcilloso expansivo y de las cenizas volantes de acuerdo con los criterios establecidos en Colombia. Posteriormente, se caracterizaron las características de la mezcla de suelo (arcilla expansiva) y cenizas volantes en las proporciones de 30%, 35% y 40%, y finalmente se evaluó el potencial de la capacidad

portante para la subrasante. Los resultados de la caracterización del suelo mostraron que el suelo era arcilloso, con una plasticidad del 24% y un índice de fluidez de 0,293. El ensayo CBR reveló que el índice de expansión era de 13,23% y la densidad seca máxima era de 1.344 gr/cm³ con un contenido de humedad óptimo de 24,5%. Cuando se probó el valor CBR del suelo al 95% de su densidad seca máxima, el estado natural del suelo tenía un valor del 6,8%. A medida que aumentaba la cantidad de cenizas volantes añadidas al suelo, disminuían tanto la densidad seca máxima del suelo como su contenido óptimo de agua. Sin embargo, el valor de CBR del suelo con adición de ceniza volante se incrementó, por lo que se obtuvo valores de 18.0%; 15.3% y 9.3% para las proporciones de 30%; 35% y 40% de adición de ceniza. Llegaron a la conclusión de que la proporción del 30% de cenizas volantes presentaba un mejor desarrollo en el suelo arcilloso. Sin embargo, sugieren realizar ensayos mineralógicos tanto en la arcilla como en la mezcla de suelo y cenizas volantes para obtener un análisis detallado del comportamiento físico y mecánico de la mezcla.

Según (PARRA, 2018) en trabajo de investigación titulado “Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante”. La estabilización química de un suelo (caolín) se iba a realizar añadiendo cal y cenizas en diferentes porcentajes. Esto se iba a hacer para establecer la dosis óptima de estabilizador, que se iba a determinar por la resistencia a la compresión y a la tracción. Para llevar a cabo la investigación se utilizó un enfoque científico con un esquema experimental. Se analizaron las características físicas y mecánicas del suelo como parte del desarrollo de la investigación que se estaba llevando a cabo. A continuación, se llevó a cabo una investigación sobre las resistencias a la compresión y a la tracción del suelo de tipo caolín con la adición de cal y cenizas volantes para identificar el comportamiento mecánico del suelo. Los resultados de la resistencia a la compresión revelaron un crecimiento de la resistencia hasta la ruptura, tras lo cual se mantuvo y posteriormente

descendió. Las proporciones de 4% de cal y ceniza mejoraron notablemente la resistencia a la compresión, lo que permitió concluir que ésta aumentó. Fue posible reconocer la mejora de la resistencia a la tracción con respecto a la adición de cal y ceniza individualmente. La proporción del 8% de cal y ceniza mejoró la resistencia a la tracción del material. Llegó a la conclusión de que la resistencia de las muestras de ensayo aumentaba independientemente de la adición de cal y cenizas, lo que confirmaba la adaptabilidad de los materiales para estabilizar químicamente los suelos que tenían un alto porcentaje de arcilla. Por otro lado, el autor resalta que la cal es una buena opción para el tratamiento de suelos debido a la facilidad de uso y su bajo costo.

Según (COBOS, y otros, 2019) los resultados del estudio de investigación titulado “Caracterización del comportamiento geotécnico de suelos de origen volcánico estabilizados con cenizas provenientes de cáscara de coco y cisco de café”. El enfoque fue científico e incluyó el diseño de experimentos. Cuando se examinó la muestra en el laboratorio, se comprobó que estaba formada por tierra procedente de la finca de Monte Madero. La finca de Monte Madero está situada en la vecindad del nevado del Ruiz, que es responsable de la formación de depósitos directos de suelo a base de cenizas volcánicas. Durante la prueba CBR, se añadieron cenizas de cáscara de café y cáscara de coco en porcentajes del cinco por ciento, diez por ciento y quince por ciento, respectivamente. Recordar este punto clave es de suma importancia. Para avanzar en el estado del estudio, se realizaron varios experimentos para determinar las características del suelo. Se realizaron varias pruebas, como el equivalente de arena, el contenido de materia orgánica medido por ignición, el tamaño de las partículas, los límites de Atterberg, la gravedad específica y la compactación. El equivalente de arena fue una de las pruebas. Los resultados de la prueba indicaron que el suelo era del tipo orgánico MH-limo, tenía un índice de plasticidad del 35,58% y una

gravedad específica de 2,56 g/cm³ cuando el suelo estaba húmedo y de 2,57 g/cm³ cuando estaba seco. Además, el suelo tenía un índice de plasticidad del 35,58%. Además, los resultados mostraron que el suelo tiene un índice de flexibilidad del 35,58%. Además, el suelo tenía un índice de plasticidad del 35,58%. Cuando se añadieron al suelo cáscara de café y cenizas de cáscara de coco, los valores de CBR aumentaron significativamente, con valores superiores al 63,55% hasta alcanzar valores de 101,61% de CBR. El CBR del suelo, antes de realizar cualquier cambio, mostraba un valor de 76,67% con 56 golpes. La investigación llegó a la conclusión de que las cenizas de la cáscara de coco y de la cáscara de café funcionan como conglomerados que mejoran la calidad del suelo. El porcentaje de ceniza que eleva los valores de CBR se sitúa en torno al 15%.

2.1.2. Nacional

Según (CASTRO, 2017) en su tesis titulada “Estabilización de suelos arcillosos con ceniza cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante”. Para evaluar si la ceniza de cáscara de arroz puede utilizarse como material que puede estabilizar los suelos arcillosos, el objetivo de este experimento es utilizarla como subrasante del pavimento y someterla a una serie de pruebas. Por ello, el asfalto tendrá como subrasante una base compuesta por ceniza de cascarilla de arroz. Como muestra de estudio se utilizó suelo arcilloso del distrito de La Calzada en la provincia de Moyobamba en el departamento de San Martín, mientras que la ceniza de cascarilla de arroz se adquirió de "Molinera Amazonas SAC" en Tarapoto-San Martín. Ambas localidades se encuentran en el departamento de San Martín. Ambas localidades se encuentran en el departamento de San Martín. Ambos lugares se encuentran en el departamento de San Martín. El hecho de que la ceniza de cáscara de arroz se manejara en diferentes cantidades durante el curso de la investigación, además de la inclusión de la cal, contribuyó al diseño experimental del estudio. Se realizaron experimentos en el

laboratorio para determinar las características físicas, las características mecánicas y las características químicas de los materiales que se estaban investigando para crear el estudio. Para determinar si la ceniza de cáscara de arroz es eficaz cuando se utiliza como estabilizador principal, los investigadores crearon una serie de mezclas de suelo distintas, y luego añadieron una cantidad diferente de ceniza de cáscara de arroz a cada una de esas mezclas de suelo. A continuación, compararon los resultados de estos experimentos. Además, se crearon combinaciones de suelo arcilloso con ceniza de cáscara de arroz y cal para investigar si la ceniza sirve o no como estabilizador secundario y para aumentar el grado de mejora de las cualidades del suelo. Como resultado directo del hecho de que la combinación de suelo, ceniza de cascarilla de arroz y cal se comportó mucho mejor que la combinación de suelo, ceniza de cascarilla de arroz y cal, el CBR para la primera combinación de suelo, ceniza de cascarilla de arroz y cal subió del 5% al 38%. La inclusión del material condujo a mejoras en los resultados obtenidos, y estas mejoras se notaron como resultado de la inclusión del material. La combinación de tierra, ceniza de cascarilla de arroz y cal produjo mejores resultados que la combinación de tierra, ceniza de cascarilla de arroz y cal, por lo que la inclusión del material condujo a mejoras en los resultados obtenidos. Se descubrió que el uso de la ceniza de cáscara de arroz como ingrediente estabilizador adicional en las operaciones de pavimentación tiene la capacidad de proporcionar resultados que son favorables en términos de consolidación del suelo. La ceniza de cáscara de arroz tiene una alta concentración de sílice, lo que le da la capacidad de actuar admirablemente como agente estabilizador primario y secundario. Esto contribuyó a la consecución de los resultados mencionados. Por lo tanto, es de suma importancia que esta etapa específica del proceso se lleve a cabo teniendo en cuenta esta faceta. El uso de cenizas obtenidas de la cáscara de arroz

como agente estabilizador adicional da más peso a los resultados de la cuestión medioambiental que se observó en el lugar analizado.

Según (APOLINAREZ, 2018) en su tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, titulada “Estabilización de la subrasante con la incorporación de ceniza vegetal - Jauja”. con el objetivo de investigar el impacto que tendría la integración de cenizas vegetales en la estabilización de la subrasante de la avenida Huarancayo en Jauja. Durante el proceso de desarrollo del estudio se utilizó ceniza vegetal en cantidades de 15%, 25% y 35% respectivamente. Para lograr este objetivo, se recogieron dos muestras de la calzada objeto de la investigación y se analizaron en el laboratorio en cumplimiento de la NTP y el MTC. Además de eso, la ceniza de los vegetales fue sometida a un examen químico. Los resultados que se obtuvieron indican que la dosis óptima para estabilizar la subrasante se adquirió añadiendo un 35% de ceniza vegetal, lo que dio como resultado un CBR de 24,7% y 23,7%, respectivamente, para el NTP y el MTC. Esto se logró obteniendo un total de 23,7% como CBR. Se determinó que la estabilización de la subrasante con ceniza vegetal es extremadamente excelente ya que se ajusta a los criterios de los requisitos. Esta fue una de las razones para llegar a esta conclusión.

Según (DÍAZ, 2018) en su tesis con el título "Mejoramiento de la subrasante utilizando ceniza de cascarilla de arroz en la ruta Dv San Martín-Lonya Grande, Amazonas 2018" para obtener el título profesional de Ingeniero Civil. Es esencial llevar a cabo este estudio para tener una comprensión de cómo las características mecánicas del suelo de la subrasante serían influenciadas por la absorción de la ceniza de cascarilla de arroz en el suelo de la subrasante. La metodología de investigación utilizada en este estudio fue un experimento porque el valor de la variable independiente, que era la ceniza de cascarilla de arroz, se varió ajustando los porcentajes de 10%, 15%, 20% y 25% para modificar el valor

de la variable dependiente, que era el suelo de la subrasante. Se obtuvo una muestra no probabilística del suelo en el borde de la carretera, que se utilizó para determinar la capacidad portante del suelo. Sobre esta muestra se realizó el ensayo Proctor modificado, así como el ensayo CBR. Para ayudar a mejorar la consulta, se realizaron cálculos de la granulometría de la subrasante, de los límites de Atterberg, del Proctor Modificado y de la capacidad portante CBR, utilizando cantidades variadas de adición de ceniza de cascarilla de arroz. Según los resultados, la adición de ceniza de cascarilla de arroz al suelo tiene la capacidad de mejorar la resistencia del suelo y, al mismo tiempo, reducir las deformaciones transversales inducidas por las cargas de tráfico. Se descubrió que la adición al suelo de un suplemento consistente en un veinte por ciento de ceniza de cáscara de arroz aumentaba la capacidad portante del suelo, reducía la cantidad de deformaciones transversales y la absorción de agua y, finalmente, hacía que el suelo fuera más estable.

Según (GOÑAS, 2019) Su tesis se tituló "Estabilización de suelos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada", y tenía como objetivo examinar el impacto que tenían las cenizas de carbón en la mejora de las características mecánicas de las muestras de suelo. Esto se hizo para que pudiera obtener un título en ingeniería civil y trabajar en la industria a tiempo completo. A partir de muestras de suelo recogidas en dos manzanas diferentes de la calle Las Lomas, que luego se analizaron, se determinó el contenido de humedad natural del suelo, además de su granulometría, las limitaciones de consistencia, la compactación Proctor estándar y la capacidad portante (CBR) con 15%, 20% y 25% de cenizas de carbón. Todos estos factores se tuvieron en cuenta. Los resultados demostraron que un aumento de la cantidad de ceniza de carbón que se inyectó en el suelo es proporcional a un aumento correspondiente de la capacidad del suelo para soportar peso. Aunque se demostró que las cenizas de carbón pueden aumentar la capacidad portante de los suelos en

CH y OH, los porcentajes de ceniza que se aportaron no fueron suficientes para estabilizar los suelos hasta el punto de poder utilizarlos como subrasante mejorada de acuerdo con el Manual de Carreteras. Esto es algo que debe abordarse en el futuro. Ello planteó un dilema a tener en cuenta.

Según (BUENO, y otros, 2019) para obtener el título profesional de Ingeniero civil, los autores sustentaron la tesis titulada “Mejoramiento de la estabilidad del suelo con cenizas de carbón con fines de pavimentación en el barrio del Pinar, Independencia, Huaraz - 2018”. En el barrio de Pinar, ubicado en el distrito de Independencia - Huaraz, se quiere utilizar las cenizas de carbón como parte del proceso de pavimentación para lograr el objetivo de mejorar la estabilidad inherente del suelo. Los redactores del estudio se refirieron a muchas ideas asociadas al tema para facilitar la creación de la investigación. Estas teorías incluían los suelos, las cenizas de carbón y las pruebas de laboratorio (límite líquido, límite plástico, análisis granulométrico, Proctor modificado y CBR), La muestra de suelo se recogió en diferentes lugares de la región del Pinar, y poseía características tanto arenosas como limosas. Los resultados de los experimentos realizados mostraron que la adición de cenizas de carbón al suelo natural en porcentajes del 3%, 5% y 10% en peso dio resultados positivos, siendo el porcentaje de adición del 5% de cenizas de carbón el más beneficioso para el suelo. Los resultados de los experimentos realizados mostraron que la incorporación de cenizas de carbón al suelo natural fue un éxito. Se llegó a la conclusión de que había una mejora considerable en la estabilidad del suelo cuando se estableció que la adición de un 5% de ceniza de carbón al suelo arenoso daba lugar a un CBR del 95% del 14,32%. Esto llevó a la conclusión de que la estabilidad del suelo había mejorado considerablemente.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Ceniza de carbón vegetal

2.2.1.1. Cenizas

Las cenizas son un subproducto de la combustión del carbón pulverizado y suelen aparecer en los lugares donde se genera la energía. Esta sustancia es un polvo que se compone de diferentes óxidos y álcalis, así como de sílice y alúmina. Además, tiene cualidades puzolánicas y es capaz de formar componentes cementantes cuando se combina con cal hidratada mediante una reacción química. (BRAJA, 2012)

2.2.1.2. Propiedades de la ceniza volante

A continuación, se enumeran las principales características de la puzolana:

- **Propiedad puzolánica**

Tanto la forma en que lo hace como el ritmo al que lo hace están determinados por el proceso mediante el cual la sílice de las cenizas volantes se mezcla con el hidróxido de calcio que se crea durante el proceso de hidratación del cemento portland. La tasa de reactividad de las cenizas volantes es mucho menor que la de la totalidad de las puzolanas naturales. (GONZÁLES, 2014)

- **Pérdida por ignición**

Las cenizas volantes en cuestión tienen una pérdida considerable en el valor de ignición. (carbono no quemado) provocan la decoloración de la superficie del acabado como resultado del aumento del número de partículas de carbono. Esto se debe a que las cenizas volantes incluyen una mayor concentración de carbono que la que se quemó realmente. La disminución de óxidos clave como la sílice, el aluminio y el óxido de hierro reduce la eficacia de las cenizas volantes como puzolana, lo que podría provocar un retraso en el fraguado. (GONZÁLES, 2014)

- **Granulometría**

La cualidad más esencial de las cenizas volantes es la distribución de sus partículas en una gama de tamaños. El tamaño de las partículas seguirá siendo el mismo mientras la ceniza esté presente en la corriente de gases de escape del horno. Sin embargo, la eficiencia del molino de carbón, el origen del carbón y el funcionamiento del horno influyen en el tamaño de las partículas.

Los procesos de precipitación que dan lugar a las cenizas pueden tener entre tres y cinco fases, y cada una de ellas puede eliminar una fracción de la ceniza cada vez más fina. Por ello, el tamaño de las partículas de ceniza producidas por diferentes fuentes puede variar mucho entre sí.(GONZÁLES, 2014)

- **Fineza**

“Para controlar el nivel de finura presente en las cenizas, se ha ideado una prueba consistente en el material que puede pasar a través de una malla con una abertura de 45 micras. La cantidad de cenizas volantes que se deja pasar por la malla influye en la resistencia” (GONZÁLES, 2014).

- **Forma de la partícula**

La gran mayoría de las partículas de cenizas volantes tienen forma esférica y, por tanto, consisten en un polvo granular que tiene ciertas cualidades. La gran mayoría de las partículas tienen un tono negro y un aspecto poroso, y la mayor parte tiene un tamaño que oscila entre las 300 y las 45 micras. “Este material grueso y arenoso presenta una pérdida por ignición que es de tres a diez veces mayor que el porcentaje que pasa por el tamiz de 45 micras, lo que sugiere la existencia de carbón vegetal que sólo se ha quemado parcialmente” (GONZÁLES, 2014).

- **Densidad**

“La densidad de las cenizas volantes es una característica que está sujeta a una gran cantidad de cambios y depende directamente de la distribución del tamaño de las partículas o de la pérdida por ignición” (GONZÁLES, 2014).

2.2.1.3. Cenizas de madera de fondo

La parte más gruesa de la ceniza que se produce en el lecho inferior y en la cámara de combustión principal se denomina ceniza de fondo. Por ello, suele combinarse con otras impurezas minerales del combustible, como los lodos. Los subproductos del proceso de combustión son movidos en un horno por el aire de combustión. El material acaba llegando al fondo del horno, donde se separa por medios mecánicos. Las cenizas de fondo constituyen la mayor parte (aproximadamente el 60%) de las cenizas totales que se producen al quemar madera y carbón (MAMANI, y otros, 2017 pág. 36).

2.2.2. Estabilización de suelos

- **Estabilización**

Para estabilizar el suelo, es necesario primero dotarlo de resistencia mecánica y luego asegurarse de que esta resistencia y durabilidad se mantengan a lo largo del tiempo. Existen diferentes formas de resolver este problema, algunas de las cuales incluyen la adición de tierra adicional, mientras que otras incluyen la incorporación de uno o más compuestos que estabilizan. El proceso de compactación se produce independientemente del tipo de tecnología utilizada para estabilizar el suelo. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones[MTC], 2014)

Según el Manual de Carreteras, "los suelos que tengan un CBR del 6% o menos deben ser reconocidos como materiales apropiados para las capas de subrasante."(MTC, 2014)

- **Tipos de estabilización**

A continuación se indican algunos métodos que pueden utilizarse para hacer más estables los suelos de grano fino: “La cal y la cal mezclada con ceniza extremadamente fina son dos de las adiciones más populares utilizadas para cambiar el suelo, acelerar la construcción y aumentar la resistencia y la longevidad del suelo” (BRAJA, 2012)

- **Estabilización con cemento**

Este tipo de estabilidad se produce como resultado “una técnica que consiste en cementar y rellenar los espacios del suelo o la roca, con el objetivo de aumentar la resistencia general de la estructura y regular el flujo de agua en su interior. La inyección de cemento en suelos residuales ha demostrado ser bastante beneficiosa.” (SUÁREZ, 1998). En esta investigación se tienen en cuenta los suelos residuales característicos de la selva amazónica central de Perú.

- **Estabilización con cal**

“La cal no funciona muy bien para estabilizar suelos granulares, ya que el suelo tiene que ser tratado con cal durante al menos 80 días antes de que pueda considerarse estabilizado con cal.” (SUÁREZ, 1998)

- **Estabilización con ceniza**

La formación de materiales cementicios a partir de cenizas, de origen puzolánico, puede lograrse mediante la reacción de las cenizas con cal hidratada. Por lo tanto, para producir capas de suelo estable, las combinaciones de tierra y ceniza se compactan utilizando la cantidad adecuada de agua y bajo circunstancias cuidadosamente controladas. Se pueden producir mezclas eficaces con un 10 a 35% de cenizas extremadamente finas y un 2 a 10% de cal. (BRAJA, 2012).

En la siguiente figura, se muestra el esquema de los tipos de estabilización de suelos.

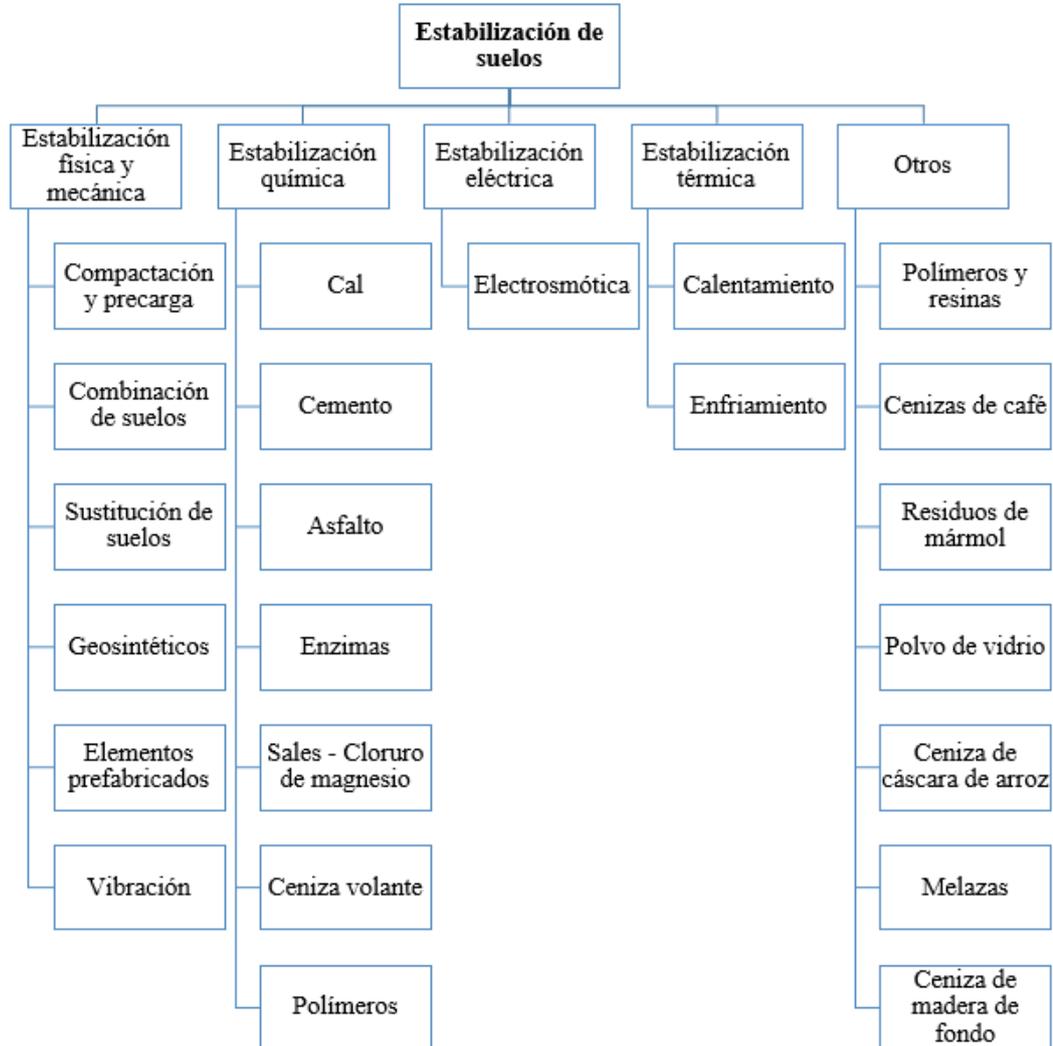


Figura 1. Tipos de estabilización de suelos
Fuente: (CASTRO, 2017)

2.2.3. Estabilización de suelos arcillosos

2.2.3.1. Suelos arcillosos

“Los suelos arcillosos se encuentran a menudo en zonas donde llueve mucho pero el drenaje es escaso; esta forma particular de suelo tiene un alto contenido de agua, pero es bastante débil. El suelo arcilloso sufre un cambio de volumen si se produce un cambio en la cantidad de humedad presente en el suelo” (KRAEMER, y otros, 2004)

La mineral montmorillonita constituye la mayor parte del suelo arcilloso, y sólo hay trazas de clorita y vermiculita en el suelo. Aunque la caolinita y la ilita no se consideran minerales activos, tienen el potencial de contribuir a las cualidades expansivas de los suelos si están presentes en cantidades adecuadas. Estos atributos tienen un impacto tanto en el campo como en el laboratorio, y se denominan factores físicos que impulsan el cambio volumétrico. En consecuencia, el cambio volumétrico también está influido por las características físicas. (FONSECA, y otros, 2006)

Es posible que el peso específico del suelo arcilloso se sitúe entre 2,60 y 2,75 g/cm³, dependiendo de la altitud y la presión del lugar donde se haya realizado la prueba. Si el material tiene una densidad más alta, el suelo será más compacto y tendrá una mayor resistencia a la erosión. (RUANO, 2012)

Continuando con Ruano (2012), Menciona el hecho de que un aumento de la saturación modifica tanto la porosidad como la humedad. Esto se debe a que un aumento de la cantidad de agua contenida en las partículas de un suelo arcilloso hace posible que el suelo pase más rápidamente de su estado sólido a líquido. Como consecuencia de ello, la fuerza cohesiva de la sustancia se reduce considerablemente y se producen partículas fluidas. Los suelos arcillosos suelen tener una cohesividad baja, con valores que oscilan entre 0,25kg/cm² y 1,5kg/cm², aunque es posible que los suelos arcillosos tengan a veces valores de cohesividad superiores a estos.

En la siguiente tabla, se puede observar el índice de plasticidad de un suelo.

Tabla 1. *Índice de plasticidad del suelo*

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
IP>20	Alta	Suelos muy arcillosos
7<IP≤20	Media	Suelos arcillosos
IP<7	Baja	Suelos poco arcillosos
IP=0	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: (Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2014)

a. Clasificación de las arcillas

Las arcillas se dividen en muchas categorías según la naturaleza de sus estructuras cristalinas.

- **Caolinitas:** Este tipo específico de arcilla es digno de confianza debido a la imposibilidad de expandir la estructura de la arcilla. Se genera por la superposición indefinida de capas aluminosas y silíceas, y el vínculo entre las partículas es tan fuerte que las moléculas de agua son incapaces de moverse entre ellas. De ahí su nombre. De ahí su nombre. Por ello, no presenta hinchazón ni expansión cuando se empapa. (CASTRO, 2017)
- **Illitas:** Este tipo de arcilla presenta fricción interna como resultado de la superposición indeterminada de una capa aluminosa y dos silíceas que componen su composición. Debido a la creación de grumos de material dentro de su composición, la superficie total que queda expuesta al agua disminuye, lo que a su vez limita su capacidad de crecimiento. Por otro lado, las caolinitas están sujetas a una hinchazón o expansión más significativa que las montmorillonitas. (CASTRO, 2017)
- **Montmorillonitas:** Esta arcilla posee una composición relativamente parecida a la de la illita; sin embargo, las láminas de su interior están muy poco unidas entre sí, lo que hace que se vuelva muy inestable cuando entra en contacto con el agua. Se produce un aumento del volumen de los cristales, así como una expansión del suelo en su conjunto, como consecuencia de que el agua puede atravesar la estructura arcillosa de las montmorillonitas con mayor facilidad.(CASTRO, 2017)

Los minerales que contribuyen a la composición de la arcilla se muestran en la siguiente imagen.

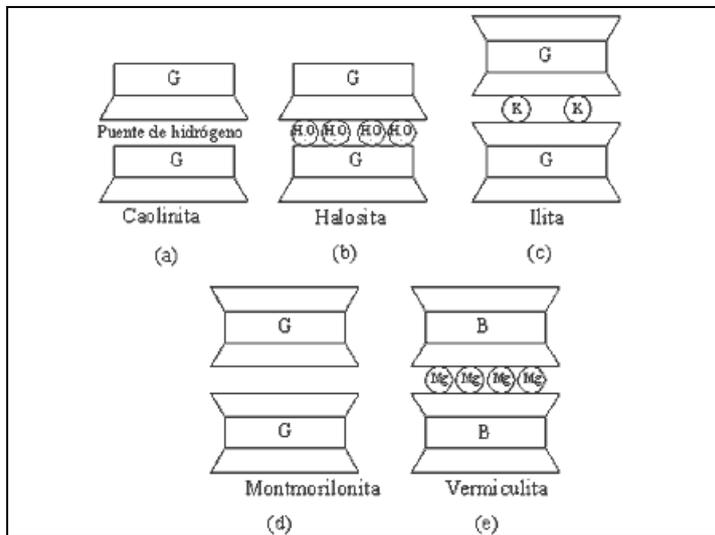


Figura 2. Minerales de arcilla

Fuente: (Ingeniería Civil - Proyectos y apuntes teórico prácticos, 2010)

b. Características físicas y químicas

Las arcillas se definen por los rasgos físicos y químicos que conforman su composición; los más importantes son los siguientes:

- Tamaño de partículas
- Morfología laminar

Se han producido sustituciones isomórficas, lo que ha dado lugar a la creación de cargas en las láminas y a la presencia de cationes ligados en el espacio que existe entre las láminas.

En los párrafos siguientes, repasaremos algunas de las características más importantes de las arcillas:

- **Plasticidad**

Debido a esta característica, el agua crea una envoltura alrededor de las partículas, lo que produce un efecto lubricante que, cuando surgen tensiones

relacionadas con la carga, puede hacer que las partículas se deslicen unas contra otras. Esta cualidad está influenciada por la morfología laminar, así como por el tamaño de las partículas, y puede ser evaluada con el uso de los límites de Atterberg (CASTRO, 2017).

- **Hidratación e hinchamiento**

El mayor grado de hidratación que poseen las montmorillonitas en comparación con otras formas de arcilla está directamente asociado al catión laminar, así como a la carga laminar. También existe la posibilidad de que el hinchamiento se produzca por la infiltración de agua en los huecos interlaminares que existen entre las láminas. Cuando se introduce agua, las láminas comienzan a dividirse y se crean fuerzas electrostáticas repulsivas entre ellas. Este movimiento ayuda a que el proceso de hinchamiento avance y separa totalmente las láminas en el proceso. (CASTRO, 2017)

- **Superficie específica**

Esta propiedad se define como “Las arcillas tienen una elevada superficie específica debido a la gran suma de las superficies exteriores e interiores de sus partículas por unidad de masa” (CASTRO, 2017).

- **Tixotropía**

Fenómeno que se caracteriza por una pérdida de fuerza al amasar, seguida de una recuperación de esa fuerza con el paso del tiempo. Cuando se amasan, las arcillas tixotrópicas se transforman en estado líquido, pero tras dejarlas reposar, recuperan su estado sólido y pueden volver a utilizarse. El comportamiento descrito anteriormente se produce cuando el contenido de agua del suelo arcilloso se acerca al umbral en el que se puede denominar líquido. El

fenómeno tixotrópico, en cambio, es imposible de ver cuando el agua está en su límite plástico.(CASTRO, 2017)

- **Capacidad de absorción**

Las arcillas se distinguen por sus características texturales, entre las que se encuentran su porosidad y su superficie específica, así como su capacidad para almacenar moléculas en el interior de los huecos interlaminares. Es bastante improbable que la absorción, que se refiere al proceso físico de retención capilar, tenga lugar independientemente de la adsorción. (interacción química entre el adsorbente – arcilla y el líquido adsorbido denominado adsorbato) (CASTRO, 2017).

- **Capacidad de intercambio catiónico**

La capacidad de intercambio de iones que está relacionada con el exterior de los cristales que están presentes en los huecos interlaminares o en cualquier otro espacio interno de la arcilla puede invertirse, lo cual es uno de los fenómenos que pueden alterarse. Esta capacidad es la que define el fenómeno. Esta capacidad se describe con la palabra "reversible". Los vacíos interlaminares y otros espacios interiores de la arcilla son ejemplos de ello. Debido a esta cualidad específica, las características mecánicas del suelo, como su resistencia a la tracción y su grado de flexibilidad, son susceptibles de cambiar. El número de cationes ligados se mueve como resultado de estos cambios, lo que a su vez genera oscilaciones en el espesor de la película superficial. Estos cambios son una consecuencia de la frase anterior. La cantidad de acidez de una solución es directamente proporcional a la capacidad de intercambio catiónico de la misma. Por lo tanto, si el pH es menor, la actividad de intercambio catiónico será mayor,

al igual que la velocidad de la solución dentro del suelo, así como la concentración de la misma. (CASTRO, 2017)

2.2.4. Ensayos de laboratorio

2.2.4.1. Análisis granulométrico

“Evaluando la composición del suelo, es posible valorar la posible influencia que la composición granulométrica de un suelo grueso tendrá en la densidad del material compactado. Esto puede hacerse si el suelo es grueso” (CRESPO, 2008).

Según el MTC (2014), “El análisis granulométrico se realiza con la intención de determinar las cantidades relativas de sus diversos componentes, que se ordenan de acuerdo con sus respectivos tamaños de partícula. La categorización del suelo se muestra en la siguiente tabla según el tamaño de la partícula”.

Tabla 2. Clasificación de suelos según tamaño de partículas

Tipo de material		Tamaño de partículas
Grava		75mm - 4.75mm
Arena		Arena gruesa: 4.75mm – 2.00mm
		Arena media: 2.00mm – 0.425mm
		Arena fina: 0.425mm – 0.075mm
Material fino	Limo	0.075mm – 0.005mm
	Arcilla	Menor a 0.005mm

Fuente: (Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2014)

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 @	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60} / D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$	
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.
		GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
			u	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla	LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.	
		ARENA LIMPIA Poco o nada de partículas finas	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	Cu = D ₆₀ / D ₁₀ mayor de 6 ; Cc = (D ₃₀) ² / (D ₁₀)(D ₆₀) entre 1 y 3.	No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW
			SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.	
		u	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.		
	SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 @	LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad	
			CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.		
			OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
			MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.		
LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido Mayor de 50		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.			
		OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.			
		p	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.			
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS				<p align="center">CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)</p>		

** CLASIFICACIÓN DE FRONTERA- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS. POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.
 @ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.
 * LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS ÚNICAMENTE. LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFJO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFJO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

Figura 3. Clasificación de suelos – SUCS
Fuente: (Studylib, 2019)

Clasificación general	Suelos granulares 35% máximo que pasa por tamiz de 0.075 mm (N° 200)							Suelos finos más de 35% pasa por el tamiz de 0.075 mm (N° 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Análisis granulométrico % que pasa por el tamiz de:												
2 mm (N° 10)	máx. 50											
0.425 mm (N° 40)	máx. 30	máx. 50	mín. 51									
F: 0.075 mm (N° 200)	máx. 15	máx. 25	máx. 10	Máx. 35	máx. 35	máx. 35	máx. 35	mín. 36	mín. 36	mín. 36	mín. 36	mín. 36
Características de la fracción que pasa el 0.425 (N° 40)												
Características de la fracción que pasa del tamiz (N° 40)												
LL: Límite de Líquido				máx. 40	mín. 41	máx. 40	mín. 41	máx. 40	Mín. 41	máx. 40	mín. 41	mín. 41
IP: Índice de Plasticidad	máx. 6	máx. 6	NP	máx. 10	máx. 10	mín. 11	mín. 11	máx. 10	máx. 10	mín. 11	mín. 11 ^(a)	mín. 11 ^(b)
Tipo de material	Piedras, gravas y arenas		Arenas Finas	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Estimación general del suelo como sub rasante	Exelente a bueno						Regular a insuficiente					

(a) Índice de Plasticidad del subgrupo A-7-5: es igual o menor que LL-30.

(b) Índice de Plasticidad del subgrupo A-7-6: es mayor que LL-30.

- Cuando se requiera relacionar los grupos con el Índice de Grupo (IG), estos deben mostrarse entre paréntesis después del símbolo del grupo, ejemplo: A-18:182-6 (3), A-4(5),A-7-5 (17), etc

$IG = (F-35) [0.2+0.005 ((LL-40))] +0.01 (F-15)(IP-10).$

Figura 4. Clasificación de suelos – AASHTO

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014)

Análisis granulométrico por tamizado (MTC 107)

Referencia normativa: ASTM D 422 – Método estándar para analizar partículas de suelo.

Alcance: Esta es una descripción del método que se utilizó para calcular los porcentajes de suciedad que pasaron a través de los distintos tamices con tamaños de apertura que van desde 74 milímetros hasta un tamaño más pequeño (N.º 200).

Equipos y materiales:

- Balanza con sensibilidad de 0.01 gr, para pesar material que pase por el tamiz N° 4 (4.760 mm).
- Balanza con sensibilidad de 0.1 gr, para pesar material retenido en el tamiz N°4 (4.760 mm).
- Estufa capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Tamices de malla cuadrada
- Envases, para el manejo de la muestra
- Cepillo y brocha, para limpiar los tamices

En la siguiente tabla se muestra la serie de tamices a emplear.

Tabla 3. *Tamices de malla cuadrada*

Tamices	Abertura (mm)
3"	75.000
2"	50.800
1 1/2"	38.100
1"	25.400
3/4"	19.000
3/8"	9.500
N° 4	4.760
N° 10	2.000
N° 20	0.840
N° 40	0.425
N° 60	0.260
N° 140	0.106

N° 200	0.075
---------------	-------

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Además, la gradación del suelo puede determinarse utilizando una variedad de tamices diferentes, como se ve en la tabla que sigue.

Tabla 4. *Serie de tamices alternativos*

Tamices	Abertura (mm)
3"	75.000
1 1/2"	38.100
3/4"	19.000
3/8"	9.500
N° 4	4.760
N° 8	2.360
N° 16	1.100
N°30	0.590
N° 50	0.297
N° 100	0.149
N° 200	0.075

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Muestra:

Las características de los materiales finos determinarán si la prueba se realiza sobre la totalidad de la muestra o sobre una parte de la misma después de haberla lavado para separar los finos del resto de la muestra. Es posible crear una muestra en dos fracciones: la primera fracción está formada por el material que queda retenido en el tamiz N°4, y la segunda fracción está formada por el material que puede pasar por el tamiz N°4. Ambas fracciones se examinarán de forma independiente. Según la información que se muestra en la tabla siguiente, la proporción del peso del material que queda retenido en el tamiz n° 4 depende del tamaño de las partículas grandes.

Tabla 5. *Peso de la muestra según partículas grandes*

Diámetro nominal de partículas más grandes mm (plg)	Peso mínimo aproximado de la porción (gr)
9.5 (3/8")	500.000
19.6 (3/4")	1000.000
25.7 (1")	2000.000
37.5 (1 1/2")	3000.000

50.0 (2'')	4000.000
75.0 (3'')	5000.000

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

La cantidad de material que pasa el tamiz N°4 (4.760 mm) será 115 gr aproximadamente para suelos arenosos y 65 gr para suelos arcillosos.

Procedimiento:

- **Análisis por medio de tamizado de la fracción retenida en el tamiz N°4 (4.760 mm)**

El manual sugiere separar y pasar el material retenido en el tamiz N°4 por la serie de tamices de: 3''; 2''; 1 ½''; 1''; ¾''; 3/8''; N°4.

El procedimiento de cribado manual consiste en mover el tamiz de un lado a otro, generando circunferencias durante un minuto para mantener la muestra en movimiento sobre la malla. Cuando no pasa más del 1% de la fracción retenida, se considera que el tamizado ha sido exitoso. En el caso de que se utilice la tamizadora mecánica, se requiere que se utilice durante un período de tiempo de diez minutos, y los resultados pueden ser examinados utilizando el enfoque manual.

A continuación, se utiliza una balanza de precisión de 0,1 g para registrar el peso del material retenido por cada tamiz. No debe haber una diferencia superior al uno por ciento entre los pesos totales de las fracciones y el propio peso.

- **Análisis granulométrico de la fracción fina**

El tamizado y/o la sedimentación son también opciones viables para realizar el análisis granulométrico de la fracción que ha conseguido pasar por el tamiz N.º 4. En el caso de las muestras con poco contenido de arcillas y limos, cuyas partículas se pueden desintegrar con facilidad, se puede realizar el tamizado en seco. Por otro lado, en el caso de las muestras con arcillas y limos, cuyas partículas no se puedan desintegrar, el análisis se realizará por la vía húmeda.

2.2.4.2. Contenido de humedad

Según el MTC (2014), “Dado que la resistencia del suelo de la subrasante, en particular de los finos, está estrechamente relacionada con las condiciones de humedad y densidad de estos suelos, la humedad natural es otra propiedad de los suelos que resulta muy esencial”.

Del mismo modo, el diseñador debe aconsejar la compactación frecuente del suelo y la adición de una cantidad aceptable de agua si la humedad natural está en niveles óptimos o por debajo de ellos. Esto es algo que debe hacerse independientemente de que la humedad natural esté en niveles óptimos o por debajo de ellos. Esto es así tanto si la humedad natural es óptima como si no. Si la humedad natural es mayor de lo que se considera ideal, deberá ofrecer además aumentar la energía de compactación del suelo, airear la tierra e incluso sustituir el material que esté saturado de humedad si resulta esencial. (MTC, 2014)

Determinación del contenido de humedad de un suelo (MTC 108)

Referencia normativa: ASTM D 2216 – Método estándar de laboratorio para determinar el contenido de agua en suelo y roca.

Alcance: Relación que se expresa como un porcentaje del peso total del agua que está presente en una determinada cantidad de suelo.

Equipos y materiales:

- Horno de secado, que puede mantener la temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de 0.01 gr, para muestras de menores a 200 gr.
- Balanza de 0.1 gr, para muestras mayores a 200 gr.
- Recipientes resistentes a la corrosión y temperatura.

Muestra:

Las muestras preservadas (inalteradas) se deben conservar en un lugar libre de luz solar hasta el momento del ensayo. A continuación, las muestras alteradas se colocan en un contenedor para evitar o, al menos, reducir la cantidad de condensación de humedad que se produce en el interior del mismo.

Si se utilizan recipientes corrosivos, como tubos de acero de paredes finas, el análisis de la humedad debe realizarse tan pronto como sea posible después de la prueba.

La cantidad de material a ensayar depende del tamaño de las partículas tal como se describe en la siguiente tabla.

Tabla 6. Cantidad de material para contenido de humedad

Máximo tamaño de partícula (pasa el 100%)	Tamaño de malla estándar	Masa mínima recomendada de espécimen de ensayo húmedo para contenido de humedad reportados	
		a ± 0.1%	a ± 1%
2 mm o menos	2.00 mm (N°10)	20 gr	20 gr *
4.75 mm	4.760 mm (N°4)	100 gr	20 gr *
9.5 mm	9.525 mm (3/8")	500 gr	50 gr
19.0 mm	19.050 mm (3/4")	2.5 Kg	250 gr
37.5 mm	38.1 mm (1 1/2")	10 Kg	1 Kg
75.0 mm	76.200 mm (3")	50 Kg	5 Kg

Nota: * Se usará no menos de 20 gr para que sea representativa

Fuente: (MTC, 2016)

Procedimiento:

Cuando se trabaje con muestras menores a los 200 gr que contengan partículas de grava, se debe descartar este material. No obstante, en el informe se debe reportar el descarte de las gravas.

Para las muestras de roca, el espécimen mínimo tendrá un peso de 500 gr; en el caso de requerir muestras representativas se puede partir en partículas pequeñas.

El procedimiento del ensayo consiste en registrar el peso inicial de la muestra con el recipiente que lo contiene, colocar en el horno de secado a temperatura constante. Después

de 12 a 16 horas, si la muestra mantiene la misma temperatura, se mide y registra el peso seco de la muestra. Para calcular el porcentaje de peso seco que se compone de agua, primero hay que restar el peso de la muestra original del peso de la muestra seca antes de dividir el resultado entre el peso de la muestra seca.

Límites de Atterberg

El objetivo de este experimento es investigar las etapas de transición que tienen lugar entre las tres fases distintas en las que puede existir el suelo, a saber, líquida, plástica y sólida. Investigar los límites de estos conceptos es el propósito del experimento. Los límites de Atterberg son las fases que tienen lugar cuando la plasticidad de un determinado tipo de suelo se caracteriza por la cantidad de humedad, o el porcentaje de humedad, a la que el suelo presenta comportamientos tanto líquidos como plásticos. Para referirse a estas fases, la expresión "límites de Aterberg" es la más útil. "El desajuste entre las propiedades del líquido y las características de la fase plástica es lo que decide si la plasticidad es adecuada o inestable" (ZANS, 1975).

- **Límite líquido**

El contenido de humedad de la muestra, que se expresa como porcentaje del peso seco del suelo, es el factor responsable de la transformación del suelo de estado líquido a plástico. La cantidad de humedad presente es el factor crítico. Según Atterberg, se afirma que la resistencia al cizallamiento de los suelos plásticos es muy baja, aunque se especifican cerca del límite líquido, que se cree que tiene un valor de 25 g/cm². El autor del documento ofreció esta explicación sobre el tema Cuando se moja, la cohesión del suelo se reduce a casi nada. (CRESPO, 2008)

Determinación del límite líquido de los suelos (MTC 110)

Referencia normativa: ASTM D 1241, NTP 339.129. Con la ayuda de este proceso de ensayo, se puede determinar el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.

Alcance: Para definir las fracciones de grano fino de los suelos, este enfoque se utiliza como componente esencial de varios sistemas de clasificación de ingeniería.

Equipos y materiales:

- El diámetro de estos recipientes de almacenamiento de porcelana es de aproximadamente 115 milímetros (4 1/2 pulgadas).
- Aparato del límite líquido (aparato de Casagrande)
- Acanalador Calibrador de 10.00 ± 0.2 mm de espesor y 50 mm de largo.
- Recipientes, resistentes a la corrosión y cambios de temperatura
- Balanza, de sensibilidad de 0.01 gr.
- Estufa, que mantenga la temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Espátula de hoja flexible
- Agua destilada o agua desmineralizada.

Muestra:

Una muestra representativa de entre 150 y 200 gramos del material que pudo pasar por el tamiz N°4 (4.760 mm).

Procedimiento:

Multipunto

Forme una superficie horizontal con un trozo de la tierra preparada presionándola y extendiéndola hasta una profundidad de unos 10 mm. Asegúrese de que

no queden espacios vacíos. Para que la muestra en el recipiente de mezcla mantenga su humedad, cúbrala con un paño humedecido.

Usando la flauta, divide la muestra que ahora está contenida en el vaso de precipitados recorriendo una línea que se extiende desde el punto más alto hasta el punto más bajo.

Comprueba si hay algún resto de la muestra escondido debajo del vaso. Una vez que haya subido y bajado el vaso, deberá hacer girar el mango a un ritmo de 1,9 a 2,1 golpes por segundo. Continúe con este proceso hasta que las dos mitades esmeriladas entren en contacto entre sí en la base de la ranura, dejando trece milímetros de espacio entre ellas en este punto.

Examine la muestra de suelo para ver si hay burbujas de aire que puedan haber hecho que la ranura se cierre antes de lo previsto. Deberá realizar más pruebas en caso de que el recipiente se abra demasiado rápido. Informar de que no se ha podido establecer el límite de líquido y registrar el suelo como no plástico sin realizar la prueba del límite de plástico si, a pesar de realizar muchas pruebas con niveles de humedad elevados, la pasta se desliza en el recipiente o el número de empujones necesarios para cerrar la abertura es sistemáticamente inferior a 25 empujones. Esto indica que el suelo no es plástico y debe registrarse como tal. Anote el número total de pulsaciones necesarias para cerrar con éxito la ranura. Una vez colocada la muestra en el plato, hay que lavar y secar el equipo Casagrande. Para aumentar la cantidad de humedad que ya está presente en el suelo, combine la muestra de suelo con un poco de agua destilada y luego mezcle las dos cosas. Esto reducirá el tiempo de cierre de la ranura.

Prueba con una junta que necesita entre 25 y 35 golpes, una junta que necesita entre 20 y 30 golpes y una junta que necesita entre 15 y 25 golpes.

Averigüe cuánta humedad hay en cada muestra de ensayo para los cierres de ranura.

- **Un punto**

El ensayo se desarrolla de la misma forma que el multipunto.

- **Límite plástico**

“Cuando los suelos cohesivos se acercan a su límite plástico, pasan de un estado semisólido a uno plástico. El contenido de humedad en el que se produce esta transición se expresa como un porcentaje del peso de la muestra tras su secado en un horno” (CRESPO, 2008).

Determinación del límite plástico de los suelos (MTC 111)

Referencia normativa: ASTM D 1241, NTP 339.129. Suelos: Técnica de ensayo de suelos para determinar sus límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad.

Alcance: El término "límite plástico" se refiere al contenido de humedad más bajo posible en el que se pueden formar barritas de tierra con un diámetro de 3,2 milímetros (1/8 de pulgada). Este es el contenido de humedad más bajo al que se pueden fabricar barritas de tierra. Este límite se define como la cantidad mínima absoluta de humedad que puede estar presente. Este es el contenido de humedad más bajo al que se pueden generar barritas de suelo. Un método que se utiliza en numerosos sistemas de clasificación de ingeniería como un componente importante para definir las fracciones de grano fino de los suelos.

Equipos y materiales:

- Recipientes de almacenamiento, jarrón de porcelana con un diámetro estimado de 115 milímetros (4 1/2 pulgadas).
- Contenedores resistentes a la corrosión y a las variaciones de temperatura

- Balanza, de sensibilidad de 0.01 gr.
- Horno o estufa, que mantenga la temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Espátula de hoja flexible que mide entre 75 y 200 milímetros de largo y 20 milímetros de ancho.
- Tamiz N°4 (4.760 mm)

El material típico para la superficie del suelo de la pista es el vidrio molido.

Muestra:

Para la prueba del límite de líquido, es necesario recoger una muestra de 20 gramos con un tamaño de partícula inferior a 4,760 milímetros en el tamiz N°4.

Para la prueba, amase la sustancia con el agua hasta formar una esfera que pese entre 1,5 y 2,0 gramos.

Procedimiento:

La parte restante de la muestra debe tener forma de elipse. A continuación, se deben formar cilindros haciendo rodar el elipsoide con los dedos sobre la superficie del vidrio esmerilado. Si el material no se ha desmenuzado antes de generar un cilindro de 3,2 mm (1/8") de diámetro, construya de nuevo un elipsoide y continúe el procedimiento hasta que la muestra se desmenuce hasta los 3,2 mm (1/8") de diámetro.

Dependiendo del tipo de suelo que se tenga, el proceso de desmenuzamiento puede aparecer de forma muy diferente en las distintas etapas. Cuando se trata de suelos muy flexibles, el cilindro se corta en piezas de 6 milímetros de longitud. En cambio, cuando se trabaja con suelos plásticos, las piezas son más cortas.

Se recolecta una muestra de 6 gr aproximadamente para para determinar la humedad.

Según el MTC (2014), indica que “Además de obtener el LP (límite plástico) y el LL (límite líquido), también se adquiere un valor distintivo conocido como índice de plasticidad

(PI). Este valor se calcula restando el LL del LP, y es uno de los valores utilizados para caracterizar la sustancia”.

$$IP = LL - LP \quad (\text{Ecuación 1})$$

El índice de plasticidad identifica la magnitud del rango de humedad dentro del cual se puede considerar que el suelo tiene una consistencia plástica. Este rango se especifica en porcentajes. Como consecuencia de ello, un IP alto se correlaciona con un suelo que contiene una cantidad importante de arcilla, mientras que un IP bajo se correlaciona con un suelo que tiene poca cantidad de arcilla.

La siguiente tabla, muestra la clasificación del suelo según el índice de plasticidad.

Tabla 7. Clasificación del suelo según índice de plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
IP>20	Alta	Suelos muy arcillosos
7<IP≤20	Media	Suelos arcillosos
IP<7	Baja	Suelos poco arcillosos
IP=0	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: (MTC, 2014)

2.2.4.3. Proctor modificado

“El ensayo Proctor Modificado se utiliza para determinar la cantidad ideal de agua que debe estar presente en un suelo para lograr el nivel de compactación deseado utilizando una determinada cantidad de energía” (ZANS, 1975).

El proctor modificado es una prueba que puede llevarse a cabo para evaluar la compactación óptima del suelo en función de la cantidad de peso que contiene un molde, además de la humedad relativa del ambiente. Esta prueba puede llevarse a cabo para evaluar la compactación óptima del suelo. Se denomina densidad aparente bajo la humedad requerida, y se lleva a cabo un procedimiento que consiste en una secuencia de trazos que

cambian en 5 capas y se conectan al aparato que se utiliza para calcular la densidad. Este método se denomina "recuento de golpes". (CARRASCO, 2017)

Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada (Proctor modificado) (MTC 115)

Referencia normativa: ASTM D 1557, NTP 339.141.

Alcance: El proceso de determinación de lo que se conoce como "densidad aparente bajo la humedad requerida" implica la realización de un método. Realizar un experimento para investigar la relación entre el porcentaje de peso unitario seco y la cantidad de agua contenida en los distintos suelos (curva de compactación).

Este criterio es aplicable a los suelos en los que menos del treinta por ciento en peso de las partículas pueden pasar por un tamiz con un tamaño de agujero de tres cuartos de pulgada (19 mm).

- **Método A**

Molde: 101.6 mm de diámetro (4'')

Material: El que pasa por el tamiz N°4 (4.760 mm)

Número de capas: 5

Golpes por capa: 25

Uso: Cuando menos del veinte por ciento del material, basado en su peso, queda retenido en el tamiz N°4.

Otros usos: En caso de que no se mencione la técnica, los materiales que cumplan este criterio podrán examinarse mediante el método B o el método C.

- **Método B**

Molde: 101.6 mm (4'') de diámetro

Material: El que pasa por el tamiz de 3/8'' (9.50 mm)

Número de capas: 5

Golpes por capa: 25

Uso: Este criterio se cumple cuando la cantidad de material que se retiene en el tamiz N°4 es superior al 20%, mientras que la cantidad de material que se mantiene en el tamiz 3/8 es inferior al 20%.

Otros usos: En el caso de que la técnica no esté detallada, los materiales que cumplan este requisito previo podrán ser evaluados mediante el método C.

- **Método C**

Molde: 152.4 mm (6'') de diámetro

Material: El que pasa por el tamiz de 3/4'' (19.00 mm)

Número de capas: 5

Golpes por capa: 25

Uso: Cuando más del 20% del material es retenido en el tamiz de 3/8'' y 30% o menos es retenido en el tamiz de 3/4''.

Equipos y materiales:

- Molde de 4 pulgadas o 6 pulgadas según el método, base y collar
- Pisón o martillo de 4.54 Kg (10 lb), con altura de caída de 457.2 mm (18 pulgadas), con 4 orificios de ventilación en cada extremo.
- Extractor de muestra opcional
- Regla metálica enrasadora
- Balanza con aproximación de 1 gr
- Tamices N°4; 3/8''; 3/4''
- Herramientas de mezcla

Muestra:

Para los métodos A y B, el tamaño de la muestra es de unos 16 kilogramos, mientras que para la técnica C, el tamaño de la muestra es de aproximadamente 29 kilogramos de suelo seco. En consecuencia, el peso húmedo de la muestra de campo debe ser de 23 kilogramos y el peso seco debe ser de 45 kilogramos.

Para elegir entre los métodos A, B y C, determine la cantidad de material que fue retenido en el tamiz N°4, así como en los tamices 3/8" y 3/4".

Procedimiento:

Seleccionar el molde de compactación, ensamblar el molde, base y collar, registrar la masa con aproximación a 1 gr. Revisar el ensamblado del pisón o martillo. Verificar la calibración de la balanza, moldes y pisón manual o mecánico a emplear.

No se recomienda reutilizar la tierra previamente compactada.

- **Método de preparación húmeda**

Sin secado previo de la muestra, pasar el material por el tamiz N°4; 3/8" y 3/4" y seleccionar el material según el método a emplear.

Prepara al menos cuatro ejemplares, e idealmente cinco, con niveles de humedad comparables al óptimo, que será el primero, añadiendo agua y combinando los ingredientes. Tendrá que determinar la cantidad de agua presente en cada uno de los otros ejemplares de manera que acabe con dos ejemplares secos y dos húmedos. La cantidad ideal de agua en los alimentos está en torno al 2%, y cualquier aumento del contenido de agua no debe ser superior al 4%.

Método de preparación en seco

Si la muestra está demasiado húmeda, el contenido de agua puede reducirse secándola al aire hasta que el material tenga una consistencia adecuada para su

manipulación. Si la muestra está demasiado seca, el contenido de agua no puede reducirse. Si la muestra no tiene un nivel de humedad anormalmente alto, el contenido de agua no puede alterarse. En primer lugar, pase el material por un tamiz y, a continuación, elíjalo de acuerdo con el método que se vaya a aplicar.

Prepara mínimo 4 especímenes (de preferencia 5) con contenidos de humedad como en la preparación húmeda.

Compactar en 5 capas con 25 golpes por capa, enrasar el material. En caso de tener algunos vacíos en la superficie, colocar una porción del mismo material en la superficie y enrasar hasta tener una superficie lisa.

Registrar el peso del espécimen con aproximación al gramo.

Extraer el material del molde, tomar una proporción de la muestra compactada (500 gr) para determinar el contenido de humedad.

2.2.4.4. Ensayo CBR en laboratorio

Después de ser cargado con ruedas, el suelo se somete a la prueba CBR, que pretende medir la capacidad del suelo para soportar cargas. Esta capacidad se refiere a la capacidad del suelo para soportar las cargas en movimiento que se requieren para pasar por encima de él en una estructura vial determinada.(VALERO, 1978).

Después de que el suelo haya sido clasificado de acuerdo con los sistemas AASHTO y SUCS, se debe desarrollar el perfil estratigráfico para cada área homogénea, como se indica en la parte del Manual de Carreteras titulada "Suelos y Pavimentos". “Este paso debe realizarse después de haber analizado el suelo. Este perfil se utilizará para construir el programa de pruebas para el valor de soporte del suelo (CBR) utilizando una penetración de carga de 2,54 milímetros como estándar” (MTC, 2014).

Además, se discuten los factores que deben tenerse en cuenta para calcular el valor CBR de diseño de la subrasante:

- “Cuando hay seis o más valores CBR en un sector, el valor CBR de diseño de la subrasante se va a derivar tomando la suma de todos esos valores CBR y promediándolos. Esto garantizará que la subrasante tenga características homogéneas” (MTC, 2014).
- En el caso de que se disponga de menos de seis valores de CBR, deben tenerse en cuenta los siguientes factores:
 - o A la hora de determinar si se descubre o no un valor medio, hay que determinar primero si los resultados son o no similares entre sí.
 - o Si no se pueden comparar los valores, hay que tener en cuenta el más importante, que es el CBR más bajo, o dividir la sección en subsectores que tengan valores de CBR comparables entre sí y luego determinar la media, teniendo en cuenta que la longitud de los subsectores debe ser superior a 100 metros.

En la siguiente tabla, se puede observar las categorías de subrasante según el CBR.

Tabla 8. *Categorías de subrasante*

Categoría de subrasante	CBR
S0: Subrasante inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante insuficiente	3% ≤ CBR < 6%
S2: Subrasante regular	6% ≤ CBR < 10%
S3: Subrasante buena	10% ≤ CBR < 20%
S4: Subrasante muy buena	20% ≤ CBR < 30%
S5: Subrasante excelente	CBR ≥ 30%

Fuente: (Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2014)

CBR de suelos (laboratorio) (MTC 132)

Referencia normativa: ASTM D 1883

Alcance: Esta prueba examina la resistencia potencial de los materiales utilizados en los pavimentos de carreteras y aeropuertos. Estos materiales incluyen materiales reciclados, así como capas de subrasante, subbase y base. El CBR es un componente fundamental de varias metodologías de diseño de pavimentos flexibles.

Equipos y materiales:

- Presione para forzar la entrada del pistón en la muestra. La distancia entre la base y la cabeza debe controlarse a un ritmo de 1,27 milímetros por minuto (0,05 pulgadas por minuto). La capacidad de la prensa y del sistema de medición de la carga debe ser de al menos 44,5 KN (10 000 lbf), y la presión mínima en la medición debe ser de al menos 44 N (10 lbf).
- Molde cilíndrico de metal, 152,4 mm \pm 0,66 mm de diámetro interior, 177,8 mm \pm 0,46 mm de altura, collar de metal suplementario de 50,8 mm de altura, placa de base perforada de 9,53 mm (3/8") de espesor.
- Disco espaciador de metal, de forma circular de 150,8 mm (5 15/16") de diámetro exterior, con espesor de 61,37 mm \pm 0,127 mm, para insertar como falso fondo en el molde de cilindro de compactación.
- El examen proctor actualizado incluye un apisonador de compactación, que funciona de la misma manera que se describe allí.
- El dispositivo de medición de la expansión está formado por una placa perforada para cada molde que tiene un diámetro de 149,2 mm (5 7/8") y está equipada con un vástago en el centro que tiene un sistema de tornillo que permite ajustar su altura. Se puede colocar un trípode sobre el molde y se conecta con un dial (deformímetro) para medir la expansión con una precisión de unos 0,025 milímetros (0,001 pulgadas).

- Pesas: una o dos pesas anulares de metal que tengan una masa total de 4.54 ± 0.02 Kg y pesas ranuradas cada una con masa de 2.27 ± 0.02 Kg.
- Un pistón de penetración metálico de sección circular que tiene un diámetro de 49,63 0,13 mm, un área de sección transversal de 19,32 cm² y la longitud necesaria para realizar el ensayo de penetración con las sobrecargas.
- Tanque, con capacidad para sumergir los moldes en agua.
- Estufa termostáticamente controlada, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de 20 Kg de capacidad, con precisión de 1 gr.
- Balanza con capacidad de 1 000 gr, con sensibilidad de 0.1 gr.
- Tamices: N°4, ¾" y 2"
- Misceláneos, cápsulas, probetas, papel filtro

Muestra:

Se deben preparar muestras para un molde de 152.4 mm.

Procedimiento:

Prepare las muestras de acuerdo con las instrucciones proporcionadas en la norma proctor modificada. Cuando más del 75% del material pueda pasar por el tamiz de ¾ de pulgada (19,10 mm), el material en cuestión es el que se utilizará para el ensayo. Cuando la fracción de la muestra que queda retenida en el tamiz de ¾" (19,10 mm) es superior al 25% en peso, el material retenido se retira y se sustituye por una porción igual del material que estaba contenido entre los tamices de ¾" (19,10 mm) y N°4 (4,760 mm) cuando se tamizó otra porción de la muestra.

Se considera la humedad óptima obtenida del ensayo de compactación con proctor modificado.

Durante el proceso de fabricación de la muestra, se registra el peso del molde después de haberlo unido a la base. Después, se apilan el cuello, el disco espaciador y el papel de filtro en el orden en que fueron registrados. Una prueba típica puede incluir de tres a nueve moldes diferentes. Durante el proceso de compactación, se golpea una muestra de suelo con 55, 26 y 12 golpes por capa, respectivamente, con el fin de desarrollar una familia de curvas que ilustren la relación entre la gravedad específica, el contenido de humedad y la capacidad de carga. Estas curvas pueden utilizarse posteriormente. Se hace un molde para un punto de la curva por cada número de golpes que se dan.

Si el espécimen va a ser sumergido, se recoge una parte del material de entre 100 y 500 gramos antes del proceso de compactación, y otra muestra de igual peso se toma al final y se mezcla para calcular el porcentaje de humedad. Si la muestra no se va a sumergir, se retira un trozo del material del suelo compactado después de la prueba de penetración y tras dividir la muestra extraída por la mitad. Esto se hace en el caso de que la muestra no vaya a ser sumergida.

Una vez finalizado el proceso de compactación, se retira el collarín y se enrasa la muestra para asegurarse de que las depresiones se rellenan con material adicional libre de partículas gruesas.

Después de ser desmontado y reconstruido en la configuración invertida sin el disco separador, el molde está listo para ser utilizado. A continuación, se coloca un trozo de papel de filtro entre el molde y la base, y se registran los pesos del molde, la base y el suelo compactado.

Inmersión: En la muestra invertida se instala la placa perforada junto con el taco y los anillos de carga necesarios para terminar la sobrecarga que corresponde a las capas de suelo que se insertarán. Hay que tener en cuenta que la carga total nunca debe ser inferior a

4,54 kg. Se obtiene la lectura inicial utilizando el trípode y el dial para medir el hinchamiento, y se registran la lectura, el día y la hora. Durante el transcurso de 96 horas, el molde se mantiene húmedo en un tanque que mantiene un nivel de agua constante (4 días). Si el suelo es granular y se moja rápidamente, se permite la inmersión durante un corto período de tiempo. Se aconseja registrar el progreso una vez cada veinticuatro horas. La medición de la expansión se hace en porcentaje de la altura del espécimen.

Una vez transcurrido el tiempo asignado para sumergir los moldes, se sacan del agua, se escurre el agua sobrante de la parte superior y se dejan los moldes en su postura normal mientras se escurren durante 15 minutos. Después de retirar la sobrecarga y la placa perforada, se medirá el peso de la placa y se realizará una prueba de penetración. Es esencial tener en cuenta que la prueba de penetración no debe posponerse durante un tiempo excesivo tras la retirada de la sobrecarga. Este es uno de los aspectos más cruciales del proceso.

Penetración: La cantidad de sobrecarga que se suministra es suficiente para generar una intensidad de carga igual o superior al peso del pavimento. Una vez transportado el conjunto a la prensa, habrá que colocar el pistón de penetración de forma que quede centrado en el orificio situado en el centro del sobreesfuerzo anular. Una vez instalado el dial de medición, el pistón deberá asentarse aplicando una fuerza equivalente a cinco kilogramos (o quinientos newtons). Coloque los puntos de los diales de medición, como el anillo de torsión que se utilizará para medir la carga y el dial de control de penetración, en la posición cero. Esto garantizará que los diales proporcionen lecturas precisas.

Ponga algo de peso en el pistón que hace la penetración, y hágalo a un ritmo de 1,27 milímetros (0,05 pulgadas) por minuto. Las siguientes penetraciones tenían sus medidas de carga documentadas en el libro de registro:

Tabla 9. *Lecturas de penetración*

Milímetros	Pulgadas
0.63	0.025
1.27	0.050
1.90	0.075
2.54	0.100
3.17	0.125
3.81	0.150
5.08	0.200
7.62	0.300
10.16	0.400
12.70	0.500

Fuente: (MTC, 2016)

Aunque no sea obligatorio, se recomienda encarecidamente obtener estas medidas para determinar la forma de la curva. Dado que se trata de una consideración tan importante, es imperativo que le preste la atención que merece.

En esta fase, se desmonta el molde y se extrae una muestra de la parte superior, cerca del lugar donde se perforó el agujero, para determinar el nivel de humedad que hay ahora en el material.

2.3. Definición de términos básicos

- **Ceniza**

“Polvo de color gris claro que es el subproducto de la combustión completa.

Suele estar compuesto por sales alcalinas, sales terrestres, sílice y óxidos metálicos”

(Real Academia Española [RAE], 2005).

- **Compactación**

“El proceso de compactación, así como el resultado de la misma, se caracteriza por un cuerpo de textura firme y con muy pocos poros” (RAE, 2005). Al igual que en el caso de los ensayos de suelos mediante el método Proctor o el método CBR utilizando una muestra cilíndrica,

- **CBR**

El California Bearing Ratio es una prueba que se utiliza para medir el valor de la capacidad portante del suelo de la subrasante. Los valores de capacidad portante del suelo de la subrasante deben ser superiores o iguales al 6% para que la subrasante sea declarada normal, y estos valores de capacidad portante deben ser constantes en toda la longitud de la carretera proyectada para que la subrasante sea considerada normal. (MTC, 2014)

- **Estabilización**

“La acción estabilizadora y su impacto, que a menudo implica la adición de un producto químico para evitar la desintegración” (RAE, 2005).

La intención de estabilizar el suelo es proporcionarle resistencia mecánica y garantizar que esta cualidad se mantenga a lo largo del tiempo. Hay varias formas de abordar este problema, la más común de las cuales es añadir suelo adicional o aplicar uno o más productos químicos que estabilicen el suelo. Para garantizar que la subrasante sea funcional después de aplicar cualquier tipo de sistema de estabilización, es necesario comprimir primero la subrasante. (MTC, 2014)

- **Granulometría**

“Componente de la petrografía, que es la rama de la geología que se ocupa de la medición de rocas, partículas y granos en el suelo. Se encarga de determinar el tamaño de las piedras individuales, los granos, las arenas y otras partículas que componen un agregado o polvo” (RAE, 2005).

- **Suelo**

“Los granos minerales, los trozos de materia orgánica en descomposición y el líquido y el gas que rellenan los huecos entre las partículas sólidas son los componentes que forman los agregados no cementados. Se considera que estas

partículas sólidas constituyen los componentes sólidos del agregado. Componentes utilizados en la fase de construcción de varias obras de ingeniería civil para ser utilizados como materiales de construcción” (BRAJA, 2012).

- **Subrasante**

El prisma vial que se crea sobre el terreno natural ya existente incluye el asiento directo de la construcción del pavimento como componente esencial de la estructura “se compone de ciertos suelos que poseen las características deseadas, y estos suelos se compactan en capas para producir un cuerpo resistente. se construye con suelos específicos que tienen excelentes cualidades. Esto se hace para garantizar que la carrocería no se vea gravemente afectada por la carga de diseño causada por el tráfico”. (MTC, 2014)

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.

2.4.2. Hipótesis específicas

2.4.2.1.-La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la clasificación del suelo arcilloso aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.

2.4.2.2.-La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la humedad natural de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.

2.4.2.3.- La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la índice plasticidad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.

2.4.2.4.- La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.

2.4.2.5. - La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.

2.5. Variables

2.5.1. Definición conceptual

Variable independiente:

Ceniza de carbón vegetal

La ceniza es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado y suele estar relacionada con las instalaciones que generan energía eléctrica. Es un polvo con granos muy pequeños que se compone de sílice, alúmina y una variedad de otros óxidos y álcalis. Tiene una composición puzolánica y es capaz de reaccionar con la cal hidratada para producir componentes cementantes cuando se combina con ellos.(BRAJA, 2012)

Variable dependiente:

Estabilización de suelos

Dotar a los suelos de resistencia mecánica y garantizar que estas características permanezcan estables a lo largo del tiempo son los dos componentes principales de la estabilización del suelo. Existen diferentes formas de abordar este problema, algunas de las cuales incluyen la adición de suelo adicional, mientras que otras incluyen la incorporación

de uno o más compuestos que estabilizan. El proceso de compactación se produce independientemente del tipo de tecnología utilizada para estabilizar el suelo. (MTC, 2014)

2.5.2. Definición operacional

Variable independiente:

Ceniza de carbón vegetal

Cuando se trata del peso total de las muestras de suelo que deben analizarse para cada prueba de caracterización del suelo, la ceniza de carbón vegetal se añade en las siguientes proporciones 20%, 25% y 30%.

Variable dependiente:

Estabilización de suelos

El efecto de la adición de cenizas de carbón sobre el análisis granulométrico, la humedad natural, el índice de plasticidad, la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo del suelo, además de la capacidad de carga del suelo, se utiliza para determinar si el suelo ha sido estabilizado o no. Estas normas fueron desarrolladas por ASTM, AASHTO, NTP y MTC para el desarrollo de pruebas de laboratorio. También se tiene en cuenta la capacidad portante del suelo.

La operacionalización de las variables investigadas se puede encontrar en la tabla que sigue.

Tabla 10. Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA	FUENTES	INSTRUMENTOS
Variable independiente: Ceniza de carbón vegetal	La ceniza es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado y suele estar relacionada con las plantas que producen electricidad. Es un polvo puzolánico de grano fino que puede mezclarse con cal hidratada para generar componentes cementantes. Está compuesto por sílice, alúmina y una variedad de óxidos y álcalis.(BRAJA, 2012 pág. 766).	La ceniza de carbón vegetal se dosifica en las proporciones de 20%; 25% y 30% respecto al peso de las muestras de suelo necesario para cada ensayo de caracterización del suelo.	Adición de ceniza de carbón vegetal	Cantidad de ceniza de carbón vegetal	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Balanza digital con precisión de 0.01 g
				Tamaño máximo nominal de la ceniza de carbón vegetal	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Tamiz N° 200(ASTM D 422)
Variable dependiente: Estabilización de suelos	La estabilización de los suelos consiste en dotarlos de resistencia mecánica y garantizar que estas cualidades se mantengan a lo largo del tiempo. Los procedimientos son numerosos y varían desde la adición de tierra adicional hasta la integración de varios productos químicos estabilizadores. Cualquiera que sea el procedimiento de estabilización, va seguido de un proceso de compactación. (MTC, 2014 p. 113).	La estabilización de suelos se determina con el efecto de la adición de ceniza de carbón en el análisis granulométrico, humedad natural, índice de plasticidad, máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad, así como en la capacidad de soporte del suelo; siguiendo las normativas ASTM, AASHTO, NTP y MTC para el desarrollo de casa ensayo en laboratorio.	Clasificación de suelo	Análisis granulométrico	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Granulometría por Tamizado (MTC E 107- 2016)
			Humedad natural	Contenido de humedad	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Contenido de humedad (MTC E 108-2016)
			Índice de plasticidad	Límite líquido, Límite plástico	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Límite de Atterberg (MTC E 110 – 2000/ MTC E 111-2016)
			Máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad	Proctor modificado	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Proctor Modificado (MTC E 115 – 2016)
			Capacidad de soporte del suelo	California Bearing Ratio	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Proctor Modificado (MTC E 132 – 2016)

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método de investigación

(SÁNCHEZ, y otros, 2015), La estrategia consiste en llevar a cabo una investigación como medio para gestionar una serie de problemas no identificados y utilizar el pensamiento reflexivo de forma metódica y organizada.

El estudio comenzó con una revisión de la literatura existente, y luego pasó a la construcción de pruebas de caracterización del suelo arcilloso. Estas pruebas se llevaron a cabo para evaluar el impacto que la adición de cenizas de carbón tenía sobre la compactación y la capacidad portante del suelo (CBR).

En este sentido, el presente estudio es científico, ya que el material se creó de forma ordenada y metódica, al igual que los hallazgos necesarios para su presentación.

3.2. Tipo de investigación

De acuerdo con (RAMÍREZ, 2010), Los hallazgos de la investigación básica ofrecen el marco sobre el que la investigación aplicada puede construir soluciones concretas a problemas del mundo real; como resultado, los dos tipos de estudio están inextricablemente entrelazados. El objetivo de la investigación aplicada es responder a cuestiones del mundo real utilizando marcos teóricos.

Con el fin de beneficiar a los usuarios de la carretera que une las municipalidades de La Piedra y Mishiyacu en el distrito de Alexander von Humboldt, así como a la municipalidad a la que pertenecen estas dos municipalidades, se utilizó la experiencia en el campo de los suelos y pavimentos en el presente estudio.

Conforme a lo mencionado, la investigación corresponde al tipo aplicada.

3.3. Nivel de investigación

La importancia del estudio puede entenderse considerando su amplitud o grado. “pretende explicar los factores que conducen a la aparición de determinadas consecuencias y sucesos, ya sean físicos o sociales” (HERNÁNDEZ, y otros, 2014).

De acuerdo con lo mencionado en el párrafo anterior, la investigación evaluó las características del suelo (consecuencia) tras la aplicación de la ceniza de carbón en diferentes proporciones (causa), además se contó con un grupo de tratamiento control y un grupo experimental (HERNÁNDEZ, y otros, 2014).

En ese sentido, la investigación corresponde al nivel explicativo.

3.4. Diseño de investigación

Por ello, el enfoque metodológico del estudio es experimental. “La experimentación, en este sentido del término, se refiere al proceso de alterar intencionadamente algún aspecto del comportamiento con el fin de recopilar información sobre la gama de resultados que pueden producirse” (HERNÁNDEZ, y otros, 2014).

Es así que “El objetivo de este estudio era investigar el impacto de la variación de la cantidad de carbono que se añadía al suelo y evaluar cómo afectaba a la estabilidad del mismo” (HERNÁNDEZ, y otros, 2014).

De acuerdo con lo mencionado, la investigación corresponde al diseño experimental.

GE: $O_1 \times O_2$

GC: O_3

T0: Tratamiento control

T1: Suelo + Ceniza de carbón vegetal al 20%

T2: Suelo + Ceniza de carbón vegetal al 25%

T3: Suelo + Ceniza de carbón vegetal al 30%

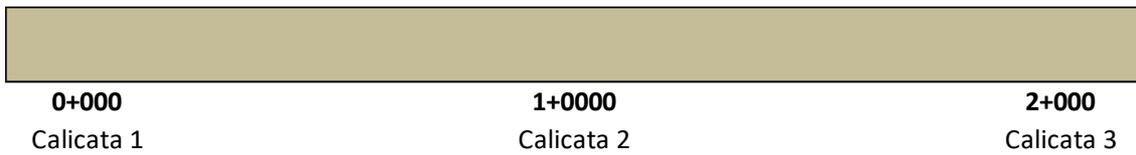
3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

Según (CASTRO, 2016), La población está formada por todos los componentes de la realidad investigada. En la investigación la población está compuesta por el tramo de 2 Km del camino vecinal Mishiyacu – La Piedra, distrito Alexander Von Humbolth, provincia Padre Abad, región Ucayali.

3.5.2. Muestra

Según (CASTRO, 2016), La población incluye la muestra, que se escoge de la población mediante diversas técnicas y sirve de representación de la población. Por ello, la muestra del estudio es no probabilística y se elige al azar; sus límites están determinados por los suelos encontrados en las tres fosas excavadas a lo largo de los dos kilómetros del camino rural. En el caso de las carreteras que tienen un nivel de tráfico bajo, el Manual de Carreteras que mantiene el MTC estipula que debe realizarse una excavación por cada kilómetro. En este caso se realizó una calicata adicional en el kilómetro 0. Tal como se muestra en el esquema.



La siguiente figura, muestra un tramo del camino vecinal Mishiyacu – La Piedra.



Figura 5. *Mishiyacu – La Piedra – Alexander Von Humbolth – Padre Abad - Ucayali*
Fuente: Imagen propia

Por otro lado, en la siguiente tabla se puede apreciar el tratamiento de las muestras de la investigación.

Tabla 11. Tratamiento de muestras

N° de Muestra	T0	T1	T2	T3
1	X1	Y1	Z1	W1
2	X2	Y2	Z2	W2
3	X3	Y3	Z3	W3
	\bar{X}	\bar{Y}	\bar{Z}	\bar{W}

Fuente: Elaboración propia

3.6. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

Debido a que la información se recogió a partir de las pruebas que se realizaron en el laboratorio, el método de recogida de datos no fue de carácter documental. Además, se incluyeron como parte del instrumento de recogida de datos las hojas de observación y los

resultados de las pruebas que se realizaron para verificar la investigación. Los formatos que se utilizan son similares a los que se encuentran en las hojas de ensayo de laboratorio. Estos formatos incluyen el análisis granulométrico, el contenido de humedad, el límite plástico, el límite líquido, el proctor modificado y el CBR de laboratorio.

3.7. Validación de los instrumentos de recolección de datos

Una vez concluidas las pruebas de laboratorio, la verificación de los instrumentos de recogida de datos fue realizada por la misma institución en la que se realizaron las pruebas de laboratorio. Esto se debe a que la institución posee todos los permisos y certificaciones de calidad necesarios para los equipos en cuestión, por lo que pudo llevar a cabo la verificación. Además, ofrecemos un servicio de calibración de los aparatos esenciales que se van a emplear en las distintas pruebas.

3.7.1. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se utilizarán hojas de cálculo de Microsoft Excel para analizar los datos de la investigación y evaluar cómo la integración de las cenizas de madera de fondo afecta a la estabilidad del suelo arcilloso. Los resultados del experimento de laboratorio se examinarán visualmente y se presentarán mediante gráficos de barras, histogramas, gráficos de líneas y gráficos de dispersión. Para confirmar la validez de la investigación, también realizaremos pruebas de hipótesis.

3.8. Procedimiento de ensayos

3.8.1. Recojo de material en campo

El Manual de ensayo de materiales del MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones), recomienda que “la cantidad de muestra a extraer debe ser entre 50 y 200 Kg para determinar las propiedades del material; referente a la profundidad de excavación esta debe ser como mínimo 1.5 m por debajo del nivel de subrasante” (MTC, 2016).

Por otro lado, el Manual de carreteras de la sección de suelos, geología, geotécnica y pavimentos; “menciona que para carreteras de bajo volumen de tránsito con un IMDA ≤ 200 veh/día de una calzada, se debe realizar una calicata por cada Km de longitud” (MTC, 2014).

De acuerdo a lo mencionado, en la investigación se realizaron 3 calicatas, una en el Kilómetro cero, una en el Kilómetro uno y una en el Kilómetro dos; con una profundidad de dos metros cada una de las cuales se obtuvo un total de material de muestra de más de 200 Kg. En las figuras, se pueden observar el recojo del material del camino vecinal Mishiyacu – La piedra, en el distrito Alexander Von Humbolth, provincia de Padre Abad – Ucayali.



Figura 6. Recojo de material en el camino vecinal Mishiyacu – La Piedra, calicata 1
Fuente: Imagen propia



Figura 7. Recojo de material en el camino vecinal Mishiyacu – La Piedra, calicata 2
Fuente: Imagen propia



Figura 8. *Recojo de material en el camino vecinal Mishiyacu – La Piedra, calicata 3*
Fuente: Imagen propia

3.8.2. Análisis granulométrico

El propósito de este experimento es descubrir los porcentajes de tierra que son capaces de pasar a través de cada tamiz sucesivo de la serie que se utilizará para el experimento, hasta el tamiz n° 200. El Manual de Pruebas de Materiales sugiere que la prueba de análisis granulométrico del suelo (MTC E 107) se realice de acuerdo con las recomendaciones establecidas por la norma ASTM D 422, y esta recomendación se puede encontrar en el manual. Esta recomendación se encuentra en la sección E.107 del Manual de Ensayos de Materiales (74mm) (MTC, 2016).

En la siguiente tabla, se muestra la serie de tamices de abertura cuadrada.

Tabla 12. *Serie de tamices de abertura cuadrada*

Tamices	Abertura (mm)
3''	75,000
2''	50,800
1 ½''	38,100
1''	25,400
¾''	19,000
3/8''	9,500
N°4	4,760
N°10	2,000
N°20	0,840
N°40	0,425
N°60	0,260
N°140	0,106
N°200	0,075

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Así mismo, se debe mencionar que la cantidad de material para el análisis granulométrico del suelo fue 300 gr, en el cual se incluyó la adición de ceniza de carbón vegetal al 20%; 25% y 30% del peso del suelo. Por otro lado, en el anexo 4 se adjuntan los formatos de los ensayos realizados para las 3 calicatas.

3.8.3. Humedad natural

La norma ASTM D 2216 es la base para la evaluación que indica la cantidad de humedad que está presente en un suelo, tal como se indica en el Manual de Pruebas de Materiales del MTC. El objetivo de la prueba es determinar la proporción de suelo que se compone de agua en una determinada cantidad de material del suelo. La prueba MTC E 108 se describe como basada en esta norma.

Es importante señalar que, además de realizar estas pruebas con el suelo solo, también se llevaron a cabo con la adición de cenizas de carbón vegetal al 20%, 25% y 30%.

3.8.4. Índice de plasticidad

El término "índice de plasticidad" se refiere a la capacidad de un material para sostener la deformación sin experimentar un rebote elástico, sin experimentar una variación volumétrica y sin desmoronarse o romperse. Los suelos son un buen ejemplo de la manifestación de esta cualidad. Se puede averiguar cuál es comparando el límite líquido con el límite plástico y observando la diferencia.

$$IP = LL - LP$$

Para la determinación del límite líquido, se necesitaba una muestra de suelo de 200 gramos, que debía poder pasar por un tamiz del número 40. Se realizaron mediciones por separado para determinar la cantidad de agua destilada necesaria para combinarse con la tierra a fin de producir una pasta. A continuación, se introdujo la mezcla en el equipo Casagrande y se creó una abertura con el dispositivo de ranurado. Se giró la manivela hasta que se cerró la abertura y, sin detenerse a contar el número de golpes hasta que se cerró, se acabó cerrando la abertura. Los ensayos se repitieron tres veces, para obtener resultados con números de golpes entre 15 a 25; 20 a 30 y 25 a 35 golpes. Así mismo se realizaron ensayos

para el suelo solo y para el suelo con la adición de ceniza de carbón vegetal en diferentes proporciones.

Para realizar la prueba del límite plástico, se extrajo una parte de la muestra del límite líquido y se utilizó para construir cilindros con un diámetro inferior a 3,2 milímetros sobre una superficie plana. En caso de que los cilindros se colapsaran, la técnica debía repetirse. A continuación, se determinó el contenido de humedad de la sustancia colocando un trozo del material en una cápsula. En este caso, también se realizaron pruebas con la muestra de tierra sola y con tierra a la que se habían añadido cantidades variadas de ceniza de carbón vegetal.

3.8.5. Máxima densidad seca y óptimo contenido humedad

Basándose en la norma ASTM D 1557, el objetivo del ensayo de compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada (Proctor modificado) con una energía de 2.700 kN (MTC E 115) es estudiar la conexión entre el contenido de agua del suelo y el peso unitario seco (curva de compactación). (MTC, 2016)

La técnica que se empleó para las pruebas fue el método C. Para este procedimiento, el molde tenía un diámetro de 6 pulgadas, el material necesario para pasar el tamiz de 3/4 de pulgada se estratificó cinco veces y cada capa recibió 56 golpes. Después de colocar el material dentro del molde, se enrasó la superficie del mismo y, a continuación, se extrajo una muestra del molde utilizando el extractor hidráulico. En el último paso, se coció una muestra del material en un horno para determinar el porcentaje de humedad presente en el suelo. Es importante señalar que la prueba se realizó un total de cuatro veces antes de poder obtener la curva de compactación. Además, se realizaron pruebas para determinar los distintos porcentajes de ceniza de carbón vegetal.

3.8.6. Capacidad de resistencia de soporte

El método de prueba estándar para determinar la capacidad portante de un suelo se conoce como Método de Prueba Estándar para el Coeficiente de Soporte de California (CBR) de Suelos Compactados en Laboratorio (ASTM D 1883). Otro nombre para este método es Método de prueba estándar para el coeficiente de soporte de California (CBR) de suelos compactados en laboratorio. Su objetivo es analizar la resistencia potencial de los materiales de la subrasante, la subbase y la base, así como los materiales reciclados utilizados en los pavimentos de las carreteras y los campos de aterrizaje (MTC, 2016).

La norma ASTM D define el CBR como la relación entre la carga unitaria necesaria para penetrar 0,1plg (2,5mm) y 0,2plg (5,1mm) del material de prueba y la carga.

La prueba se llevó a cabo mediante la técnica C de la prueba Proctor modificada en un molde de 6 pulgadas de diámetro utilizando material que pasaba un tamiz de 34 pulgadas. Se crearon tres muestras con 10, 25 y 56 golpes por capa, respectivamente. Se armó el molde de prueba (colocando primero el disco espaciador y luego el papel filtro) y se compactó la primera capa de suelo con el número de golpes determinado por la muestra que se estaba creando. Una vez terminada la colocación de la tierra, se niveló el molde, tras lo cual se retiró el disco espaciador y se colocó el papel de filtro en el fondo del molde. Posteriormente se colocaron los pesos de sobrecarga equivalente a la carga del pavimento igual a 10 lbf (5.54 Kg) y se ensambló el vástago para medir la expansión e hinchamiento. Las mediciones se realizaron el primer día y después de 96 horas. Finalmente se realizó la prueba de carga, registrando las lecturas de carga en las penetraciones de 0.250 in., 0.500in., 0.750 in., 1.000 in., 1.250 in., 1.500 in., 2.000 in., 3.000 in., 4.000 in., y 5.000 in., sin dejar de lado la medición de la profundidad de penetración del pistón en la muestra de suelo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados

4.1.1. Adición de ceniza de carbón vegetal en el tipo de suelo arcilloso

Las tablas y figuras que se muestran a continuación, corresponden al resumen de granulometría y curva granulométrica del suelo al 100% y con la adición de ceniza de carbón vegetal al 20%; 25% y 30% de la calicata 1.

Tabla 13. *Resumen de granulometría – suelo 100% - Calicata 1*

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	56.70	18.9
Fino	243.30	81.1
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

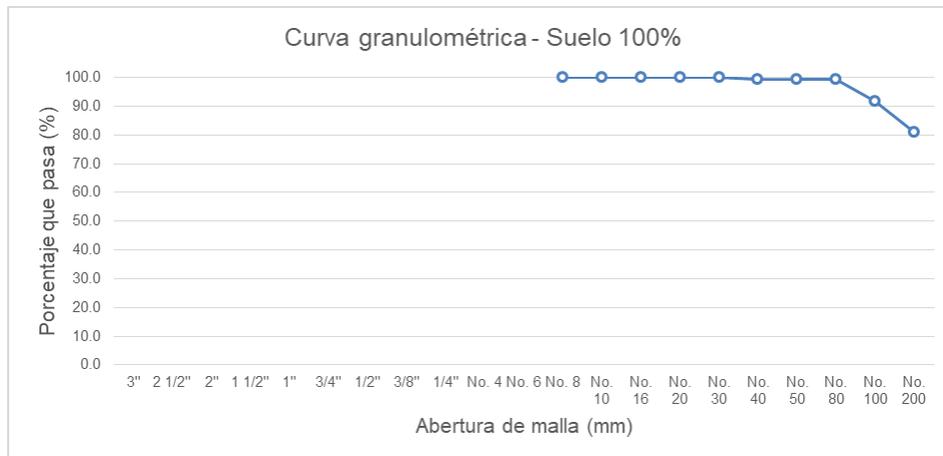


Figura 9. *Curva granulométrica – suelo 100% - Calicata 1*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. *Resumen de granulometría – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 1*

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	65.80	21.9
Fino	234.20	78.1
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

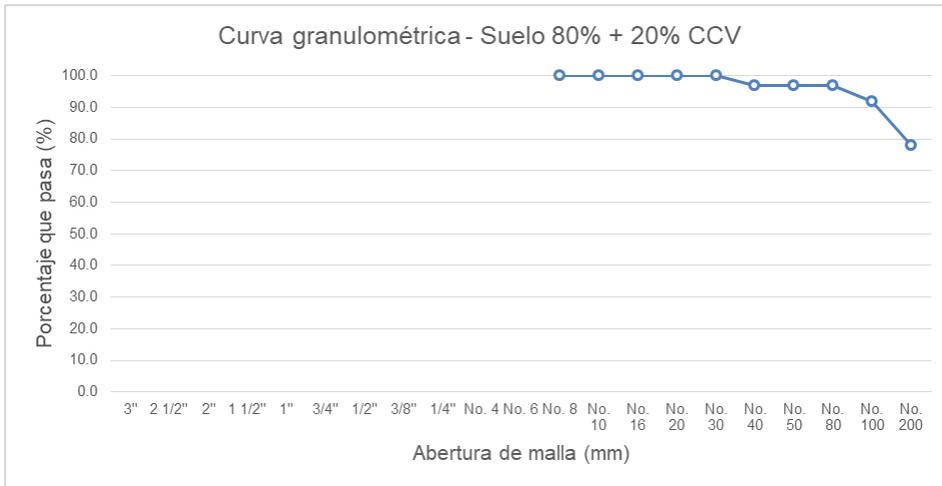


Figura 10. Curva granulométrica – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 1
Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Resumen de granulometría – suelo 75% + CCV 25% - Calicata 1

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	70.30	23.4
Fino	229.70	76.6
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

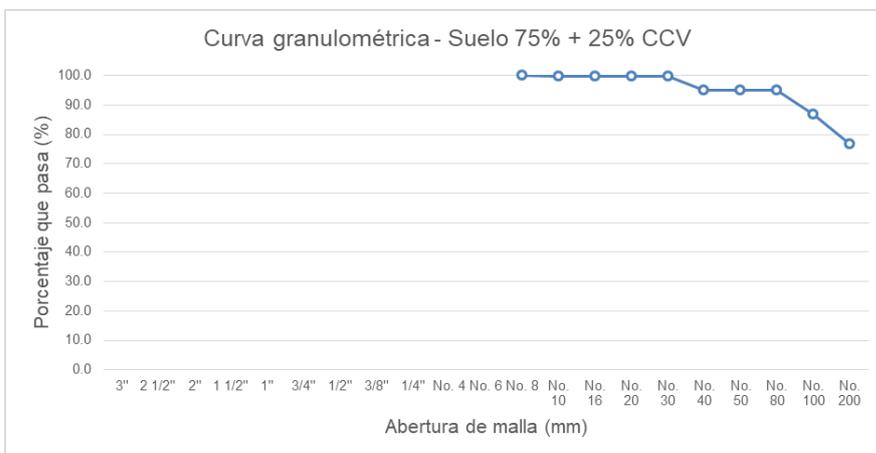


Figura 11. Curva granulométrica – suelo 75% + CCV 25%- Calicata 1
Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Resumen de granulometría – suelo 70% + CCV 30%- Calicata 1

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	73.30	24.4
Fino	226.70	75.6
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

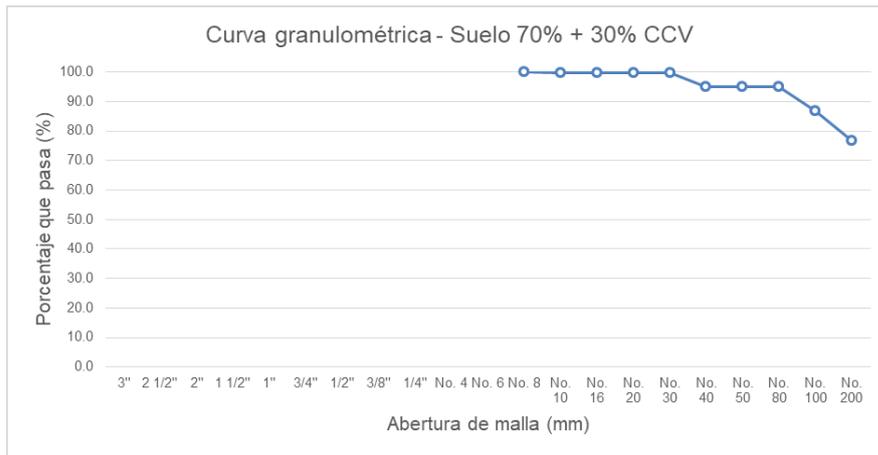


Figura 12. Curva granulométrica – suelo 70% + CCV 30% - Calicata 1

Fuente: Elaboración propia

Las tablas y figuras que se muestran, corresponden al resumen y curva granulométrica de las muestras de suelo al 100% con adición de ceniza de carbón vegetal en proporciones del 20%; 25% y 30%, de la calicata 2.

Tabla 17. Resumen de granulometría – suelo 100% - Calicata 2

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	42.60	14.2
Fino	257.40	85.8
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

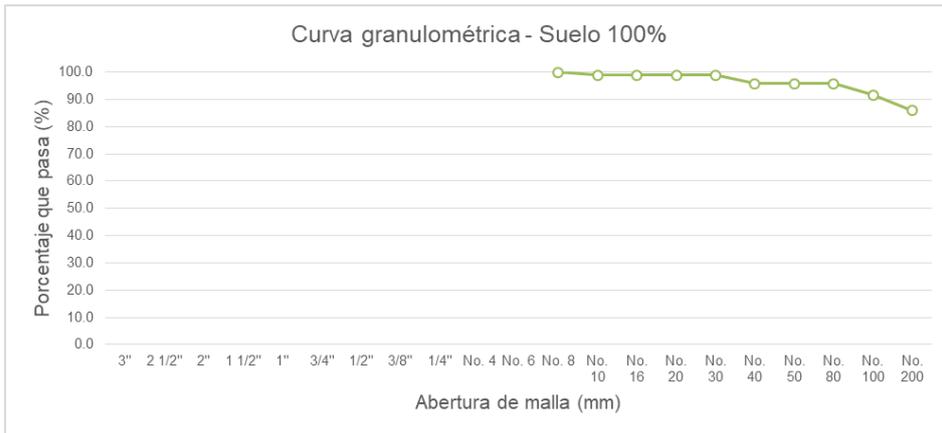


Figura 13. Curva granulométrica – suelo 100% - Calicata 2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resumen de granulometría – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 2

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	74.20	24.7
Fino	225.80	75.3
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

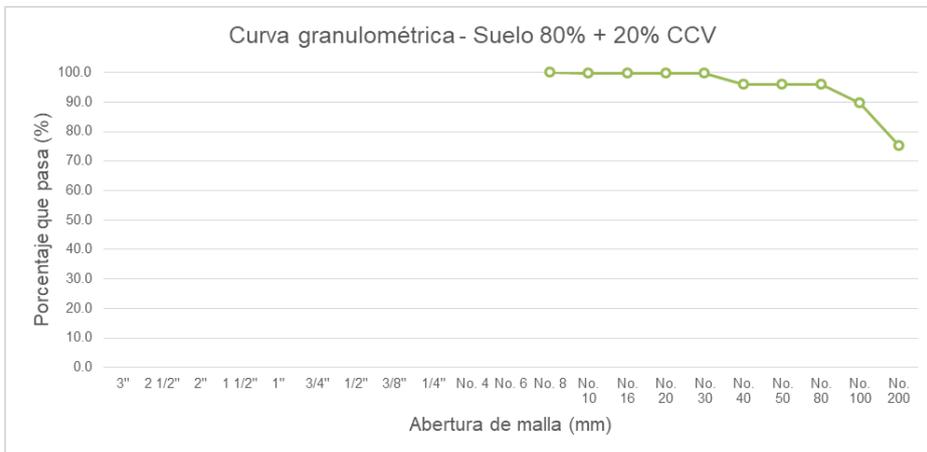


Figura 14. Curva granulométrica – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Resumen de granulometría – suelo 75% + CCV 25% - Calicata 2

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	60.60	20.2
Fino	239.40	79.8
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

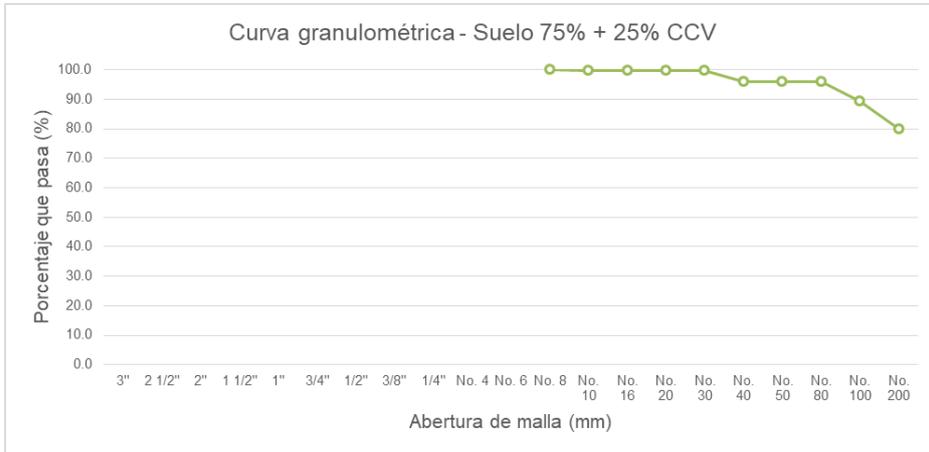


Figura 15. Curva granulométrica – suelo 75% + CCV 25%- Calicata 2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resumen de granulometría – suelo 70% + CCV 30%- Calicata 2

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	68.60	22.9
Fino	231.40	77.1
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

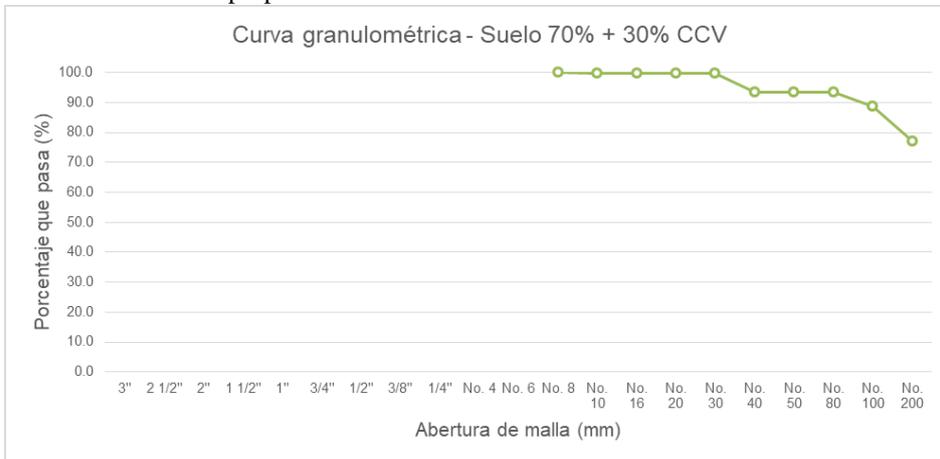


Figura 16. Curva granulométrica – suelo 70% + CCV 30% - Calicata 2

Fuente: Elaboración propia

Las tablas y figuras que se muestran, corresponden al resumen y curva granulométrica de las muestras de suelo solo y con la adición de ceniza de carbón vegetal en proporciones del 20%; 25% y 30%, de la calicata 3.

Tabla 21. *Resumen de granulometría – suelo 100% - Calicata 3*

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	28.80	9.6
Fino	271.20	90.4
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

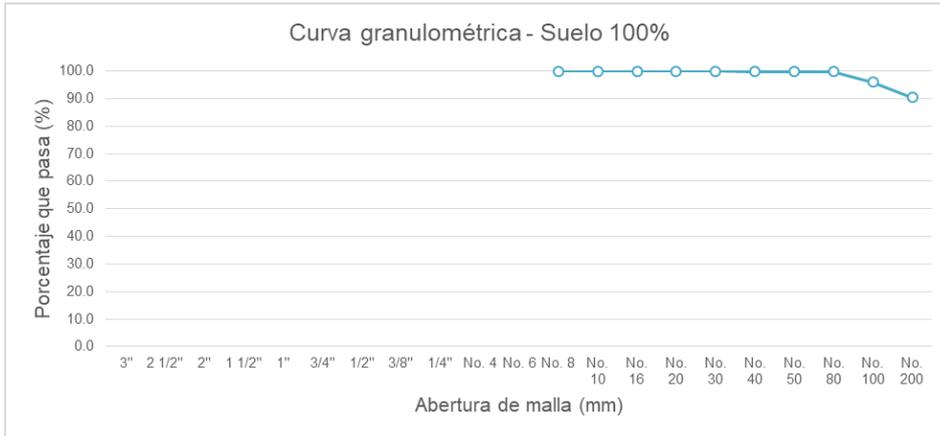


Figura 17. *Curva granulométrica – suelo 100% - Calicata 3*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. *Resumen de granulometría – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 3*

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	70.40	23.5
Fino	229.60	76.5
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

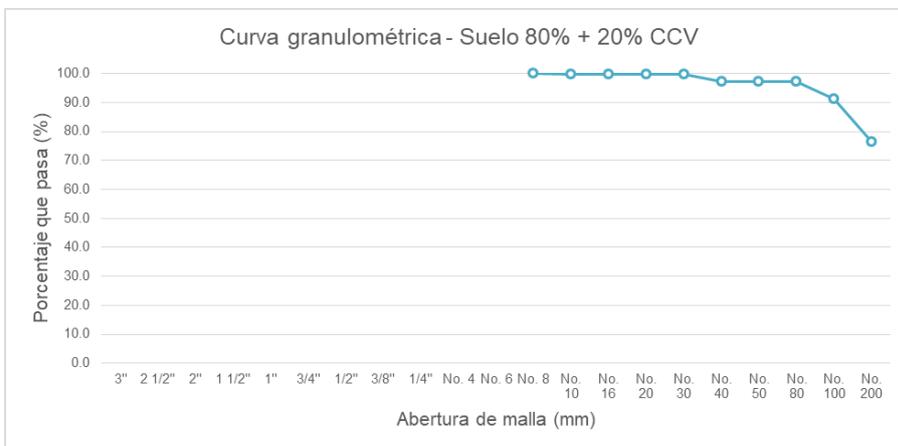


Figura 18. *Curva granulométrica – suelo 80% + CCV 20% - Calicata 3*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Resumen de granulometría – suelo 75% + CCV 25% - Calicata 3

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	66.00	22.0
Fino	234.00	78.0
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

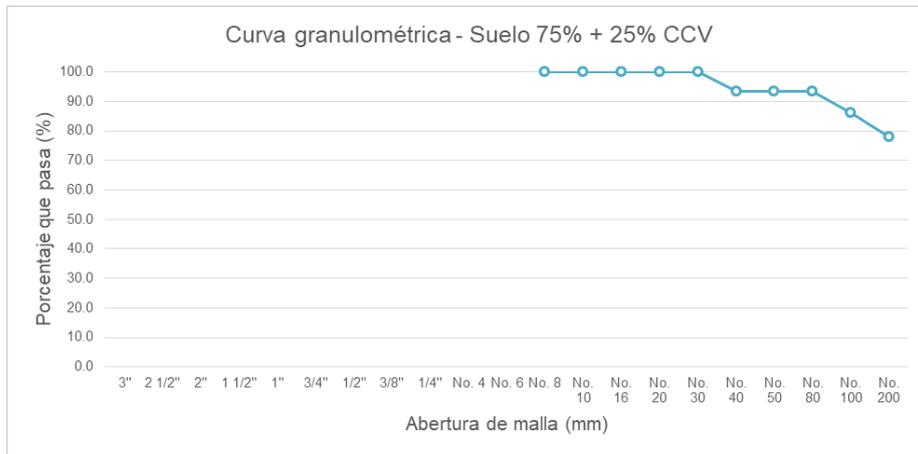


Figura 19. Curva granulométrica – suelo 75% + CCV 25%- Calicata 3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Resumen de granulometría – suelo 70% + CCV 30%- Calicata 3

MATERIAL	PESO (gr)	CANTIDAD (%)
Grava	0.00	0.0
Arena	70.90	23.6
Fino	229.10	76.4
TOTAL	300.00	100.0

Fuente: Elaboración propia

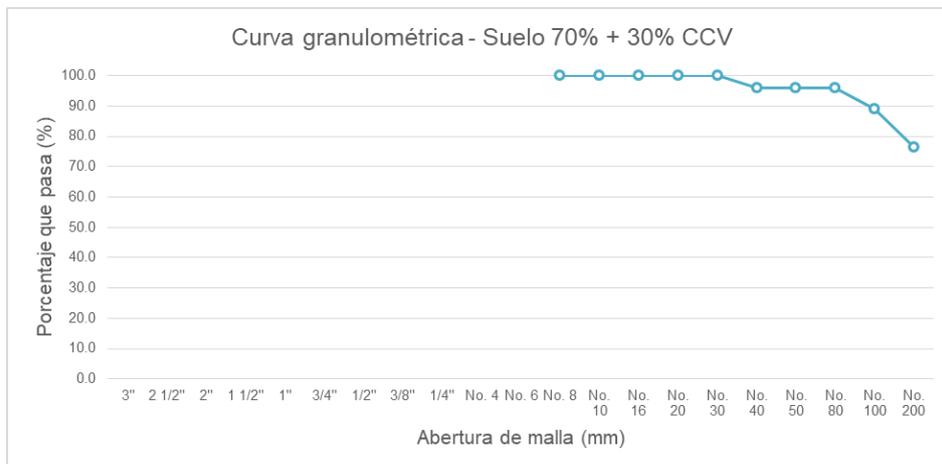


Figura 20. Curva granulométrica – suelo 70% + CCV 30% - Calicata 3

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural del suelo arcilloso

Las figuras, se muestran el contenido de humedad natural del suelo al 100% y con la adición de ceniza de carbón vegetal al 20%; 25% y 30% de las calicatas 1; 2 y 3 respectivamente.

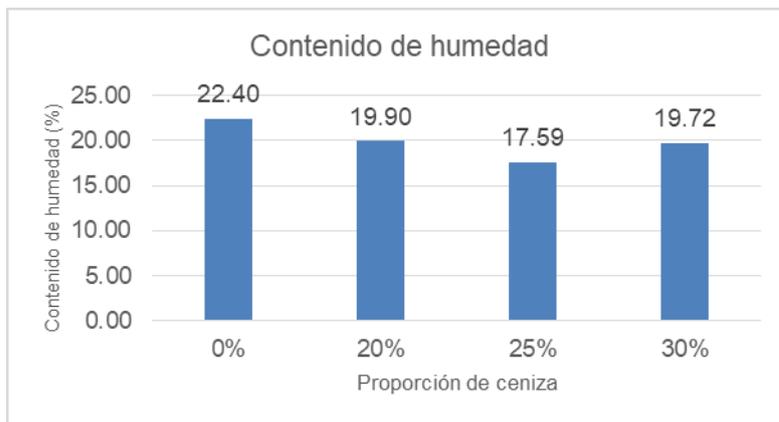


Figura 21. *Contenido de humedad natural - Calicata 1*

Fuente: Elaboración propia

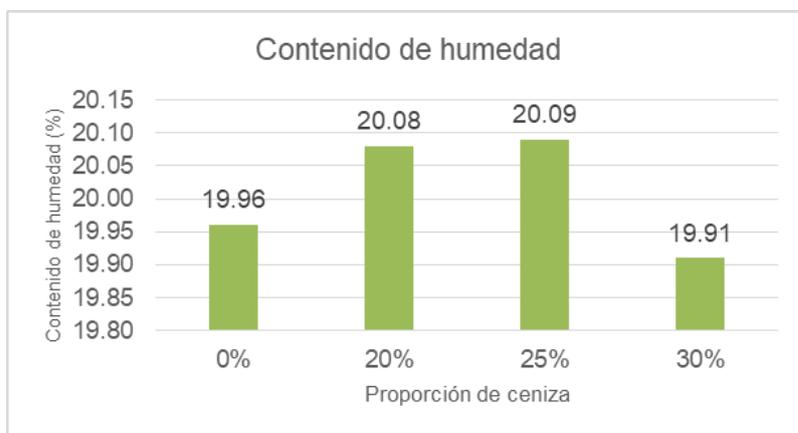


Figura 22. *Contenido de humedad natural - Calicata 2*

Fuente: Elaboración propia

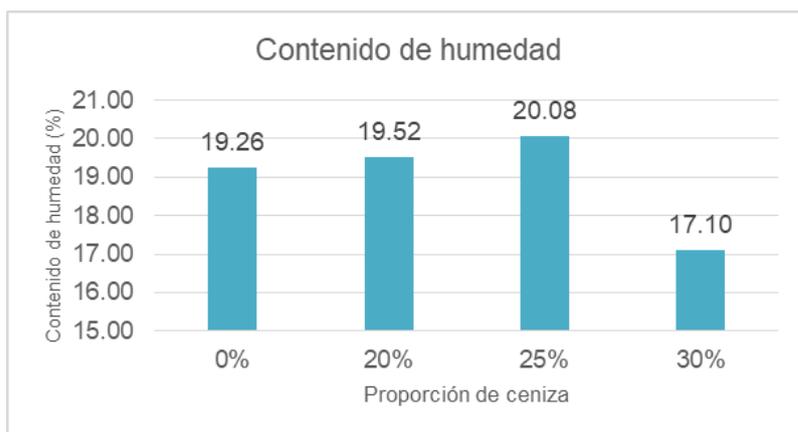


Figura 23. *Contenido de humedad natural - Calicata 3*

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Adición de ceniza de carbón vegetal en el índice de plasticidad del suelo arcilloso

La siguiente tabla detalla el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad para la fosa de ensayo 1. La tabla está estructurada de tal manera que los resultados pueden ser analizados en base a los tratamientos correspondientes a las cantidades de adición de cenizas de carbón vegetal. También se adjunta la representación gráfica de los resultados del índice de plasticidad para la calicata 1.

Tabla 25. *Índice de plasticidad - Calicata 1*

TRATAMIENTOS	MUESTRAS	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD
T0	Suelo 100%	45.4	27.5	17.9
T1	Suelo 80% + 20%CCV	45.5	26.6	18.9
T2	Suelo 75% + 25%CCV	40.4	25.6	14.8
T3	Suelo 70% + 30%CCV	40.3	25.6	14.7

Fuente: Elaboración propia

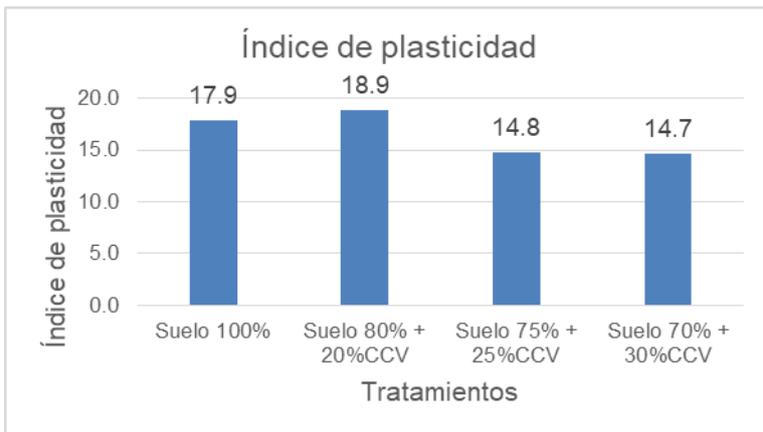


Figura 24. Índice de plasticidad – Calicata 1

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, se muestra la tabla del resultado del índice de plasticidad obtenido en la calicata 2, en la que se encuentran los tratamientos con los que se trabajó en la investigación; también se adjunta la representación gráfica respectiva.

Tabla 26. Índice de plasticidad - Calicata 2

TRATAMIENTOS	MUESTRAS	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD
T0	Suelo 100%	48.9	28.6	20.3
T1	Suelo 80% + 20%CCV	40.5	25.6	14.9
T2	Suelo 75% + 25%CCV	45.6	27.6	18.0
T3	Suelo 70% + 30%CCV	42.5	26.8	15.7

Fuente: Elaboración propia

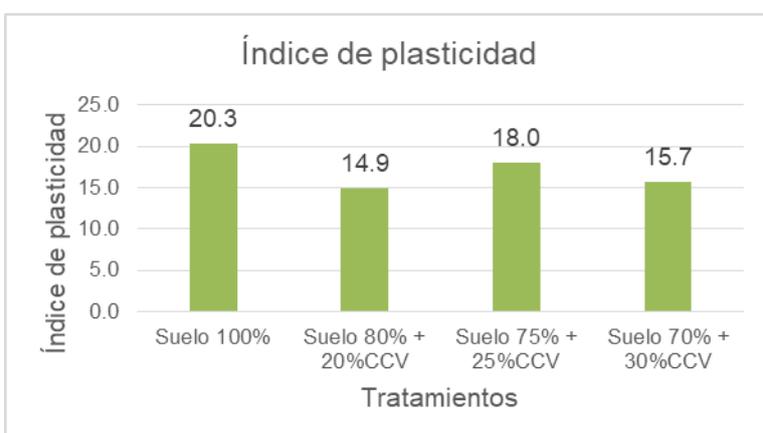


Figura 25. Índice de plasticidad – Calicata 2

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se muestra la tabla del resultado del índice de plasticidad obtenido en la calicata 3, en la que se encuentran los tratamientos con los que se trabajó en la investigación; también se adjunta la representación gráfica respectiva.

Tabla 27. *Índice de plasticidad - Calicata 3*

TRATAMIENTOS	MUESTRAS	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD
T0	Suelo 100%	57.5	27.5	30.0
T1	Suelo 80% + 20%CCV	42.5	26.7	15.8
T2	Suelo 75% + 25%CCV	44.6	27.0	17.6
T3	Suelo 70% + 30%CCV	40.3	25.1	15.2

Fuente: Elaboración propia

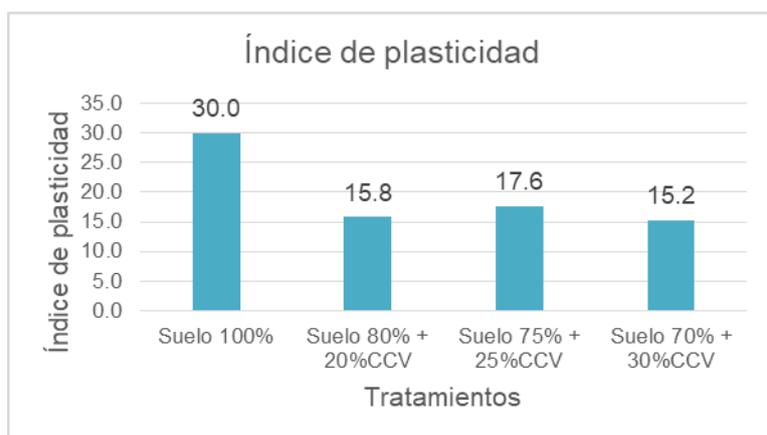


Figura 26. *Índice de plasticidad – Calicata 3*

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad del suelo arcilloso

la figura, ilustra la densidad seca máxima del pozo de la calicata 1; en la que se evidencian los tratamientos con los que se trabajó en la investigación.

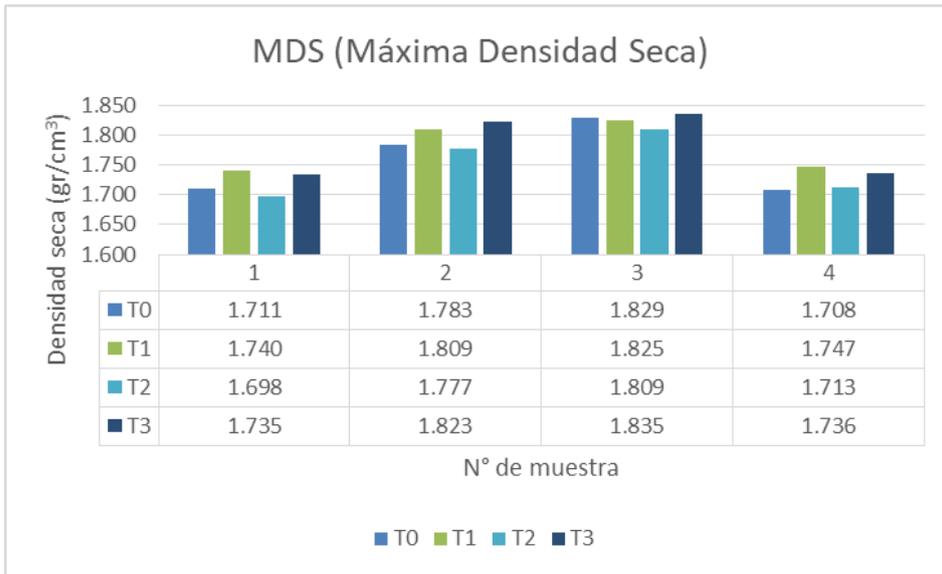


Figura 27. *Máxima densidad seca – Calicata 1*

Fuente: Elaboración propia

Al igual que la máxima densidad seca, también se obtuvieron resultados del óptimo contenido de humedad para dicha densidad seca. Como se muestra en la figura correspondiente a la calicata 1.

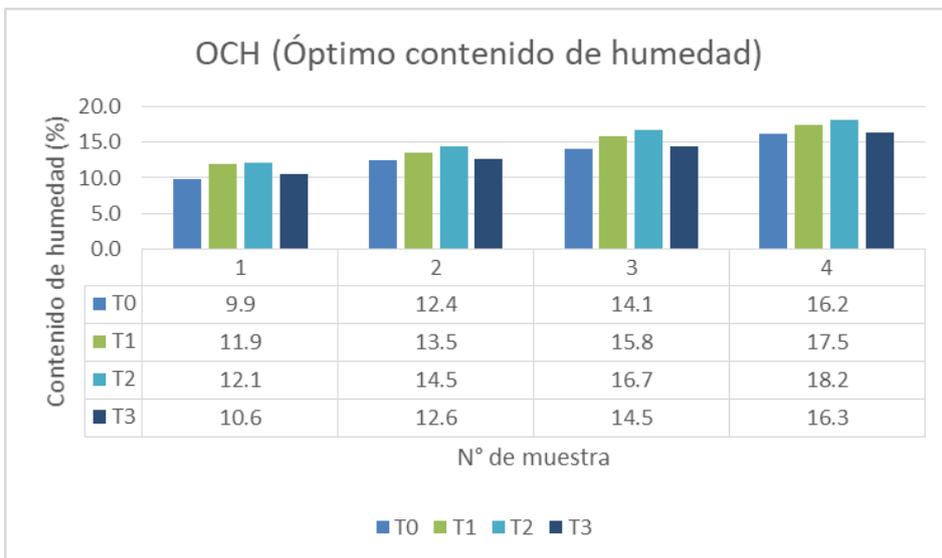


Figura 28. *Óptimo contenido de humedad – Calicata 1*

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, se presentan las figuras correspondientes a la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad de los tratamientos aplicados a la calicata 2.

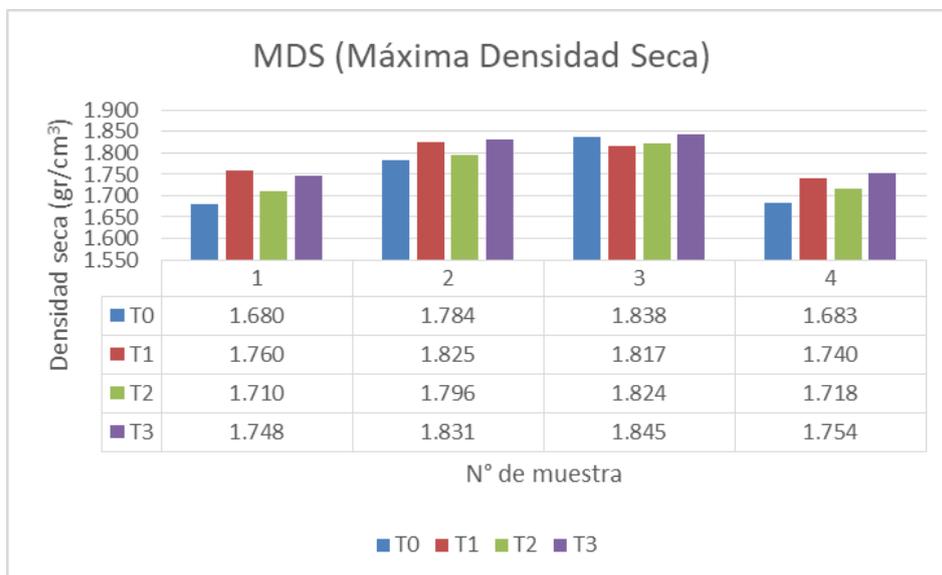


Figura 29. *Máxima densidad seca – Calicata 2*

Fuente: Elaboración propia

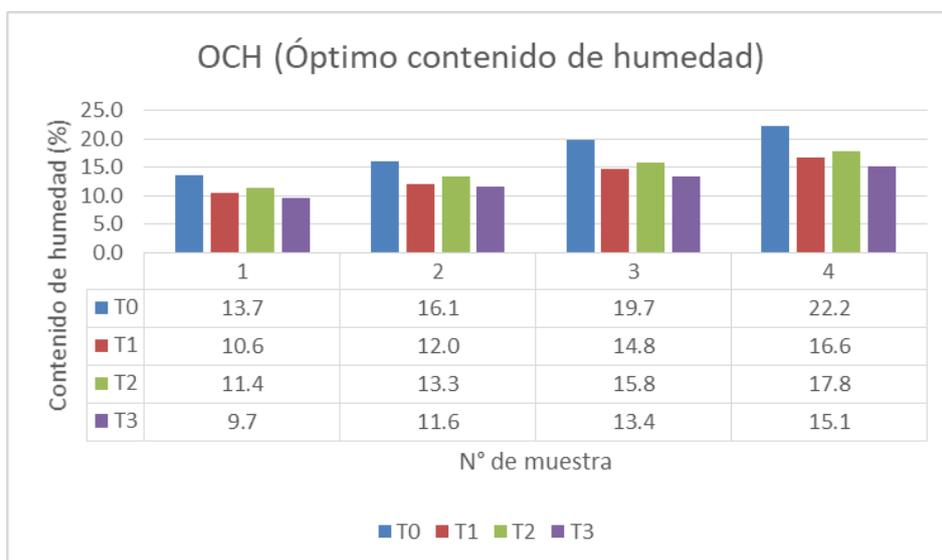


Figura 30. *Óptimo contenido de humedad – Calicata 2*

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se muestran las figuras correspondientes a la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad de los tratamientos aplicados al suelo de la calicata 3.

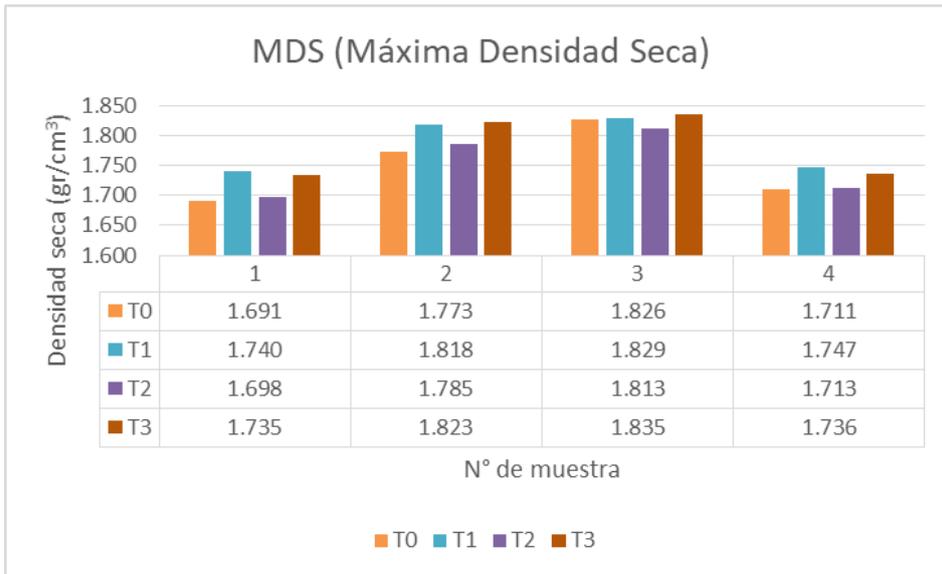


Figura 31. *Máxima densidad seca – Calicata 3*

Fuente: Elaboración propia

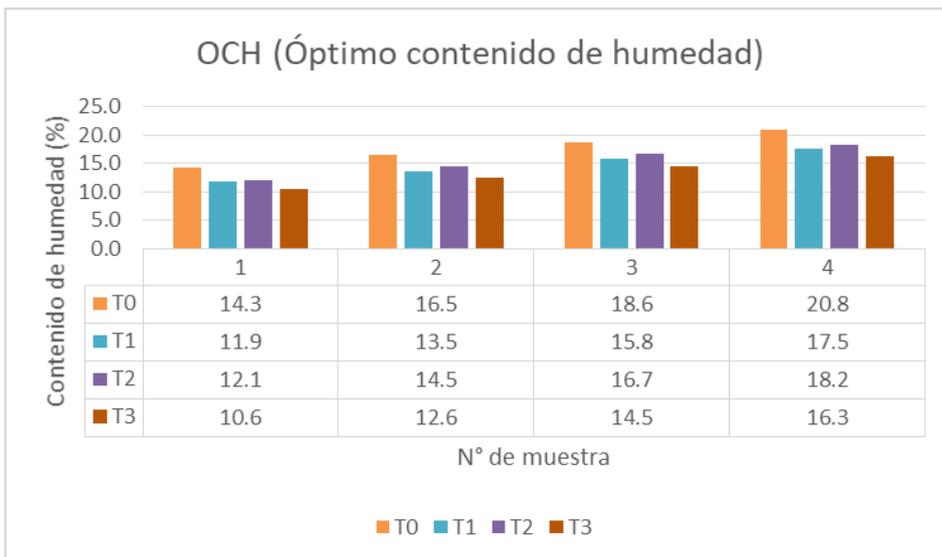


Figura 32. *Óptimo contenido de humedad – Calicata 3*

Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de soporte del suelo arcilloso

La tabla muestra los resultados de los tratamientos realizados en el suelo de la fosa 1, que corresponden al ensayo CBR al 95% de la densidad máxima seca, así como una representación gráfica de los datos.

Tabla 28. CBR al 95% de la MDS - Calicata 1

Tratamiento	Descripción	CBR AL 95% DE MDS
T0	Suelo 100%	3.00
T1	Suelo 80% + 20%CCV	22.50
T2	Suelo 75% + 25%CCV	35.40
T3	Suelo 70% + 30%CCV	37.60

Fuente: Elaboración propia

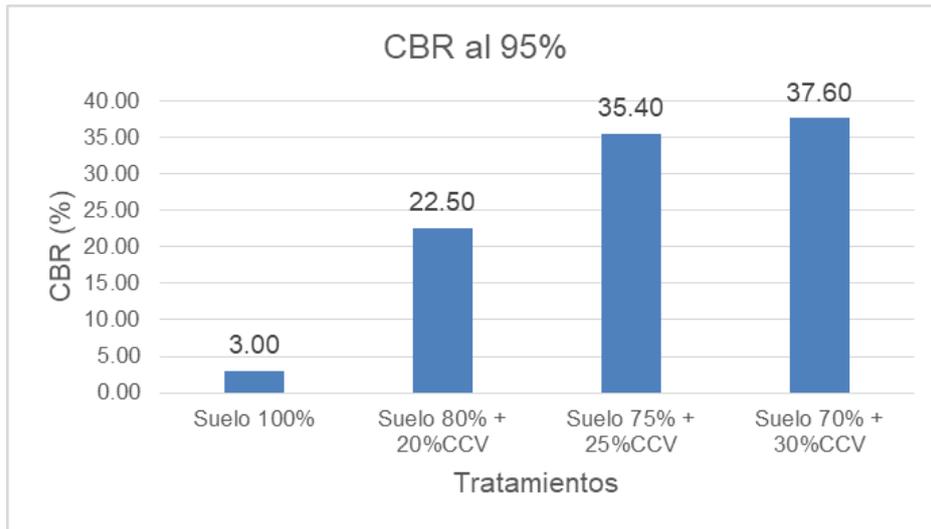


Figura 33. CBR al 95% de la MDS – Calicata 1

Fuente: Elaboración propia

También se realizó el ensayo de CBR al 100% de la máxima densidad seca, para el cual se muestra la tabla y figura correspondientes.

Tabla 29. CBR al 100% de la MDS - Calicata 1

Tratamiento	Descripción	CBR AL 100% DE MDS
T0	Suelo 100%	4.20
T1	Suelo 80% + 20%CCV	29.10
T2	Suelo 75% + 25%CCV	50.80
T3	Suelo 70% + 30%CCV	53.30

Fuente: Elaboración propia

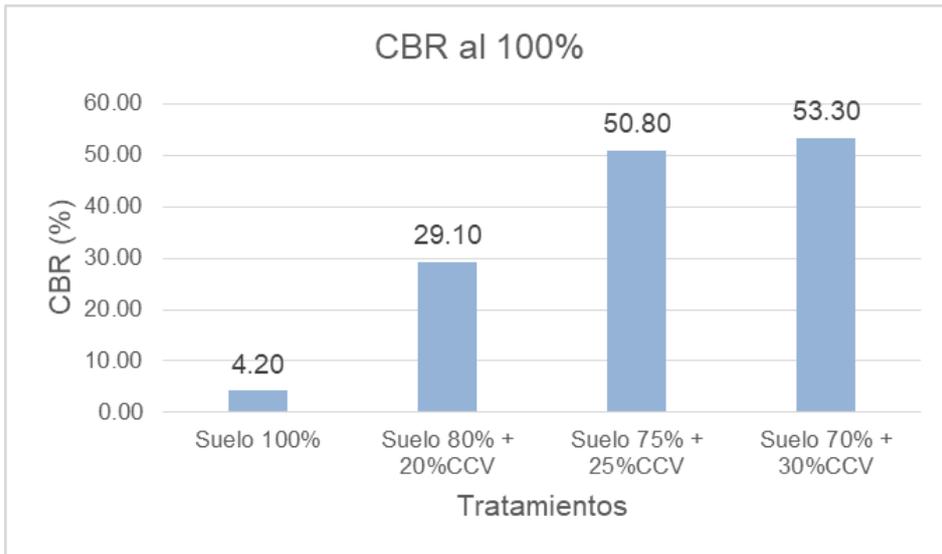


Figura 34. *CBR al 100% de la MDS – Calicata 1*

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran los resultados del ensayo CBR al 95% y al 100% de la densidad seca máxima de la calicata 2, a la que también se realizaron tratamientos de adición proporcional de cenizas de carbón vegetal.

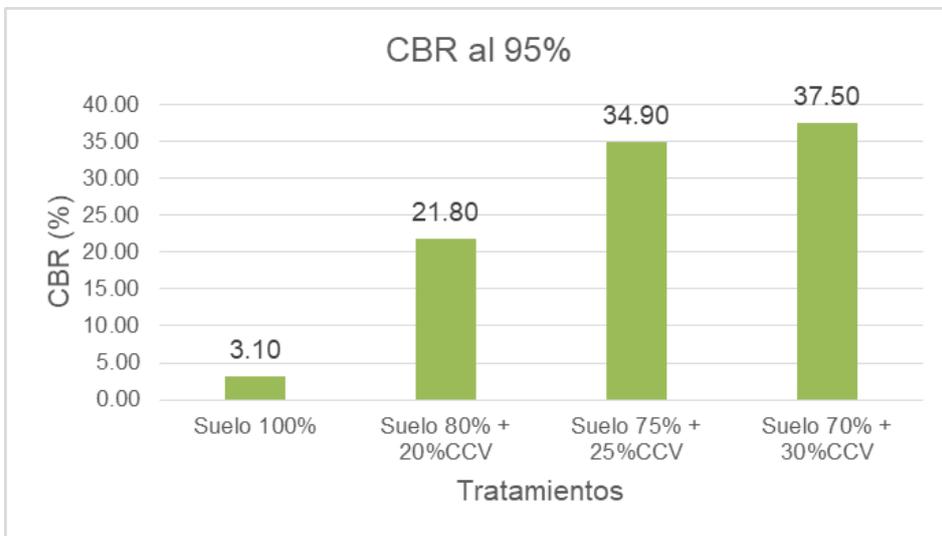


Figura 35. *CBR al 95% de la MDS – Calicata 2*

Fuente: Elaboración propia

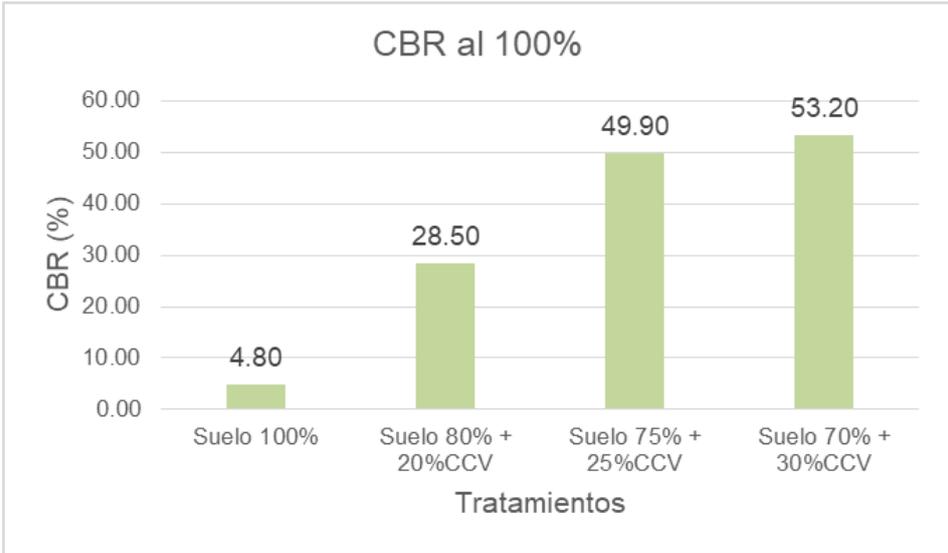


Figura 36. *CBR al 100% de la MDS – Calicata 2*

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se adjuntan las figuras de los resultados obtenidos del ensayo de CBR en laboratorio al 95% y 100% de la máxima densidad seca, de la calicata 3.

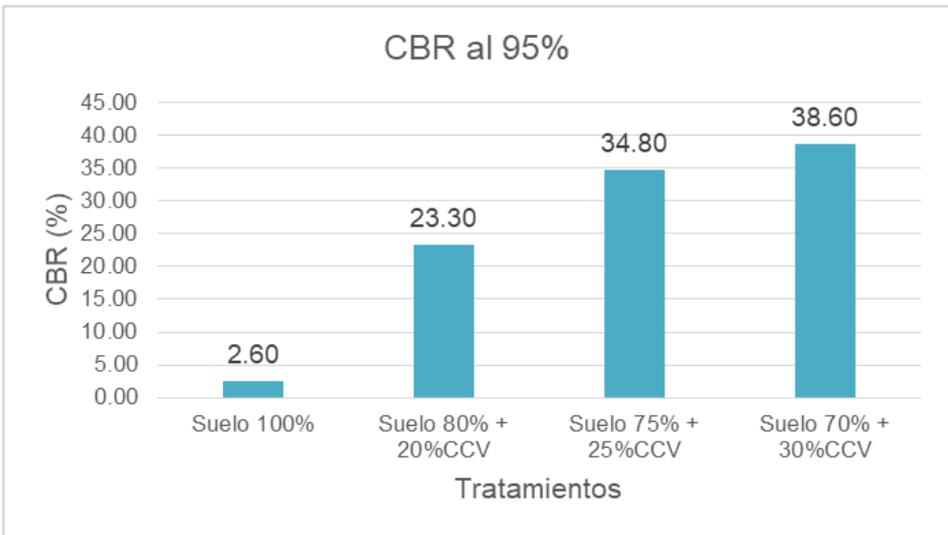


Figura 37. *CBR al 95% de la MDS – Calicata 3*

Fuente: Elaboración propia

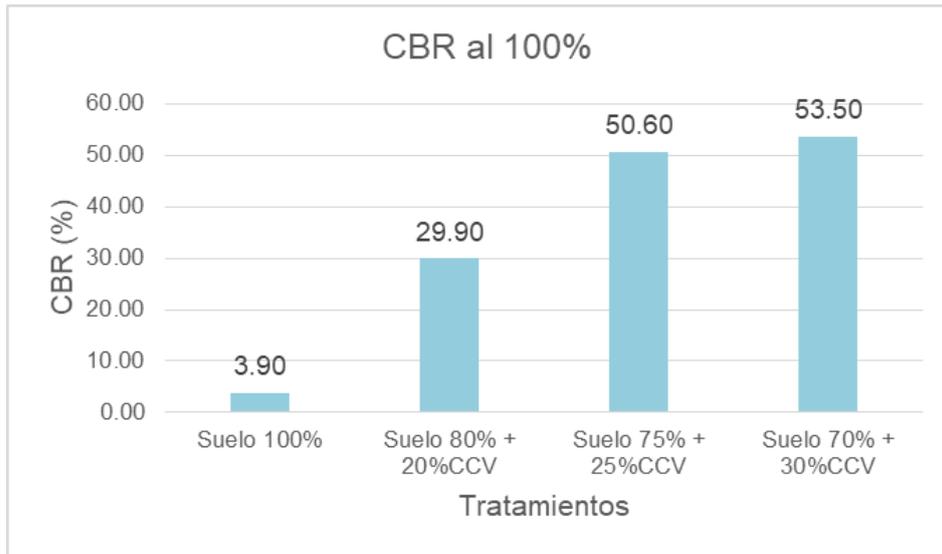


Figura 38. CBR al 100% de la MDS – Calicata 3

Fuente: Elaboración propia

4.2. Prueba de hipótesis

Para comprobar las hipótesis, las dimensiones de la humedad natural del suelo, el índice de plasticidad, la densidad seca máxima y la capacidad de resistencia del suelo se dispusieron en un patrón de bloques totalmente aleatorios; para verificar la hipótesis planteada. Posteriormente, se realizó la prueba de Tukey y Duncan para comparar las medias de los tratamientos aplicados en la investigación.

4.2.1. Adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural del suelo arcilloso

Para la dimensión de la humedad natural en el suelo arcilloso, se plantearon las siguientes hipótesis.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

Se muestra la tabla del diseño de bloques completamente al azar, donde el número de bloques se refiere a las calicatas realizadas, también se puede observar la sumatoria de bloques y tratamientos, promedio y la sumatoria total en negrita.

Tabla 30. *Diseño de bloques completamente al azar – Humedad natural*

BLOQUES	TRATAMIENTOS				Σ Trat
	T0 (Suelo 100%)	T1 (Suelo 80%+20%CCV)	T2 (Suelo 75%+25%CCV)	T3 (Suelo 70%+30%CCV)	
1	22.40	19.90	17.59	17.59	77.48
2	19.96	20.08	20.09	19.91	80.04
3	19.26	19.52	20.08	17.10	75.96
Σ Bloque:	61.62	59.50	57.76	54.60	233.48
Promedio:	20.54	19.83	19.25	18.20	

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se muestran los valores para la obtención de parámetros.

$$\begin{aligned} n &= 3 \\ T &= 4 \end{aligned}$$

A continuación, se muestran los cálculos correspondientes para armar la tabla de análisis de varianza correspondiente al diseño de bloques completamente al azar.

- Sumatoria total y promedio general

$$\begin{aligned} \sum Total &= 233.48 \\ Promedio general &= 19.46 \end{aligned}$$

- Factor de corrección

$$\begin{aligned} Fc &= \frac{X^2}{n * T} \\ Fc &= 4,542.74 \end{aligned}$$

- Suma de cuadrados del total

$$\begin{aligned} SCT &= \sum (x_{ij}^2) - Fc \\ SCT &= 23.06 \end{aligned}$$

- Suma de cuadrados de los bloques

$$\begin{aligned} SCB &= \frac{\sum x_j^2}{T} - Fc \\ SCB &= 2.13 \end{aligned}$$

- Suma de cuadrados de los tratamientos

$$SCT = \frac{\sum x_i^2}{n} - Fc$$

$$SCT = 8.81$$

- Suma de cuadrados del error

$$SCE = SCTotal - (SCB + SCT)$$

$$SCE = 12.13$$

- Cálculo de cuadrados medios

- Cuadrado medio de los bloques

$$CMB = \frac{SCB}{gl. B}$$

$$gl \text{ Bloque} = glB = 2$$

$$CMB = 1.06$$

- Cuadrado medio de los tratamientos

$$CMT = \frac{SCT}{gl_T}$$

$$gl \text{ Tratamiento} = glT = 3$$

$$CMT = 2.94$$

- Cuadrado medio del error

$$CME = \frac{SCE}{gl_E}$$

$$gl \text{ Error} = glE = 6$$

$$CME = 2.02$$

La tabla muestra, el análisis de varianza del diseño de bloques completamente al azar.

Tabla 31. *Análisis de varianza – Humedad natural*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	de g.l.	Cuadrados medios	F calculado	(Fc)	F tabulado ($\alpha=0.05$)	(Ft)
Bloques	2.13	2.00	1.06	0.53		5.14	
Tratamientos	8.81	3.00	2.94	1.45		4.76	
Error	12.13	6.00	2.02				
Total	23.06	11.00					

Fuente: Elaboración propia

Interpretación del análisis de varianza:

De acuerdo al análisis de varianza el valor de $F_c = 0.53$ y $F_t = 5.14$, con $gl_1=2$ y $gl_2=6$, se entiende que no existe diferencia significativa entre las medias de los bloques a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por lo tanto, se infiere que la humedad natural del suelo arcilloso con la adición de ceniza de carbón vegetal en las proporciones de 20%; 25% y 30%, no varía o es similar en las calicatas 1 al 3. En cuanto a los tratamientos; el valor $F_c = 1.45$ y $F_t = 4.76$, con $gl_1=3$ y $gl_2=6$ se entiende que no existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por lo que, se acepta la hipótesis nula y se puede decir que la adición de ceniza de carbón vegetal en diferentes proporciones no influye significativamente en la humedad natural del suelo arcilloso aplicado a subrasantes.

Por lo cual se realizó la prueba de Tukey, para determinar la diferencia de medias de la humedad natural del suelo arcilloso, sin ceniza y con ceniza de carbón vegetal. La prueba se realizó con el programa SPSS 23.

Tabla 32. Prueba de Tukey – Bloques – Humedad natural

Contenido de humedad natural

HSD Tukey^{a,b}

Bloques: calicatas	N	Subconjunto
		1
3,00	4	18,9900
1,00	4	19,3700
2,00	4	20,0100
Sig.		,595

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 2,021.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

b. Alfa = 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Prueba de Tukey – Tratamientos – Humedad natural

Contenido de humedad natural

HSD Tukey^{a,b}

Tratamientos	N	Subconjunto
		1
4,00	3	18,2000
3,00	3	19,2533
2,00	3	19,8333
1,00	3	20,5400
Sig.		,280

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 2,021.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

b. Alfa = 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Interpretación de la prueba de Tukey:

La prueba de Tukey, se realiza para determinar la diferencia de las medias, cuando estas tienen valores cercanos. Es así que, el bloque 1; 2 y 3 correspondientes a las calicatas 1; 2 y 3, tienen medias de humedad natural del suelo similares. De igual forma, se tiene el mismo escenario para los tratamientos, donde la media de la humedad natural obtenida en los tratamientos 1; 2; 3 y 4 son similares.

4.2.2. Adición de ceniza de carbón vegetal en el índice de plasticidad del suelo arcilloso

Para la dimensión de índice de plasticidad en el suelo arcilloso, se plantearon las siguientes hipótesis.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

Se muestra la tabla del diseño de bloques completamente al azar, donde el número de bloques se refiere a las calicatas realizadas, también se puede observar la sumatoria de bloques y tratamientos, promedio y la sumatoria total en negrita.

Tabla 34. *Diseño de bloques completamente al azar – Índice de plasticidad*

BLOQUE S	TRATAMIENTOS				Σ Trat
	T0 100%)	(Suelo T1 80%+20%CCV)	(Suelo T2 75%+25%CCV)	(Suelo T3 70%+30%CCV)	
1	17.90	18.90	14.80	14.70	66.30
2	20.30	14.90	18.00	15.70	68.9
3	30.00	15.80	17.60	15.20	78.6
Σ Bloque:	68.20	49.60	50.40	45.60	213.80
MEDIA :	22.73	16.53	16.80	15.20	

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se muestran los valores para la obtención de parámetros.

$$n = 3$$

$$T = 4$$

A continuación, se muestran los cálculos correspondientes para armar la tabla de análisis de varianza correspondiente al diseño de bloques completamente al azar.

- Sumatoria total y promedio general

$$\Sigma Total = 213.80$$

$$Promedio general = 17.82$$

- Factor de corrección

$$Fc = \frac{X^2}{n * T}$$

$$Fc = 3,809.20$$

- Suma de cuadrados del total

$$SCT = \sum (x_{ij}^2) - Fc$$

$$SCT = 198.58$$

- Suma de cuadrados de los bloques

$$SCB = \frac{\sum x_j^2}{T} - Fc$$

$$SCB = 21.01$$

- Suma de cuadrados de los tratamientos

$$SCT = \frac{\sum x_i^2}{n} - Fc$$

$$SCT = 101.10$$

- Suma de cuadrados del error

$$SCE = SCTotal - (SCB + SCT)$$

$$SCE = 76.46$$

- Cálculo de cuadrados medios

- Cuadrado medio de los bloques

$$CMB = \frac{SCB}{gl. B}$$

$$gl \text{ Bloque} = glB = 2$$

$$CMB = 10.51$$

- Cuadrado medio de los tratamientos

$$CMT = \frac{SCT}{gl_T}$$

$$gl \text{ Tratamiento} = glT = 3$$

$$CMT = 33.70$$

- Cuadrado medio del error

$$CME = \frac{SCE}{gl_E}$$

$$\begin{aligned} \text{gl Error} &= \text{glE} = && 6 \\ \text{CME} &= && 12.74 \end{aligned}$$

La tabla muestra, el análisis de varianza del diseño de bloques completamente al azar.

Tabla 35. *Análisis de varianza – Índice plasticidad*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	F calculado	F (Fc) F (Ft) tabulado ($\alpha=0.05$)
Bloques	21.01	2.00	10.51	0.82	5.14
Tratamientos	101.10	3.00	33.70	2.64	4.76
Error	76.46	6.00	12.74		
Total	198.58	11.00			

Fuente: Elaboración propia

Interpretación del análisis de varianza:

De acuerdo al análisis de varianza el valor de $F_c = 0.82$ y $F_t = 5.14$, con $gl_1=2$ y $gl_2=6$, se entiende que no existe diferencia significativa entre las medias de los bloques a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por lo tanto, se infiere que el índice de plasticidad del suelo arcilloso con la adición de ceniza de carbón vegetal en las proporciones de 20%; 25% y 30%, no varía o es similar en las calicatas 1 al 3. En cuanto a los tratamientos; el valor $F_c = 2.64$ y $F_t = 4.76$, con $gl_1=3$ y $gl_2=6$ se entiende que no existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por lo que, se acepta la hipótesis nula y se puede decir que la adición de ceniza de carbón vegetal en diferentes proporciones no influye significativamente en el índice de plasticidad del suelo arcilloso aplicado a subrasantes.

Por lo cual se realizó la prueba de Tukey, para determinar la diferencia de medias del índice de plasticidad del suelo arcilloso, sin ceniza y con ceniza de carbón vegetal. La prueba se realizó con el programa SPSS 23.

Tabla 36. *Prueba de Tukey – Bloques – Índice de plasticidad*

Índice de plasticidad

HSD Tukey^{a,b}

		Subconjunto
Bloques: calicatas	N	1
1,00	4	16,5750
2,00	4	17,2250
3,00	4	19,6500
Sig.		,486

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 12,744.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

b. Alfa = 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Prueba de Tukey – Tratamientos – Índice de plasticidad

Índice de plasticidad

HSD Tukey^{a,b}

		Subconjunto
Tratamientos	N	1
4,00	3	15,2000
2,00	3	16,5333
3,00	3	16,8000
1,00	3	22,7333
Sig.		,142

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 12,744.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

b. Alfa = 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Interpretación de la prueba de Tukey:

La prueba de Tukey, se realiza para determinar la diferencia de las medias, cuando estas tienen valores cercanos. Es así que, el bloque 1; 2 y 3 correspondientes a las calicatas 1; 2 y 3, tienen medias de índice de plasticidad del suelo similares. De igual forma, se tiene el mismo escenario para los tratamientos, donde la media del índice de plasticidad obtenida en los tratamientos 1; 2; 3 y 4 es similares.

4.2.3. Adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad del suelo arcilloso

Con la finalidad de determinar la influencia de la adición de ceniza de carbón vegetal, se plantearon las siguientes hipótesis.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

Se muestra la tabla del diseño de bloques totalmente aleatorizados de la densidad máxima seca derivada del ensayo Proctor modificado, donde el número de bloques corresponde al número de fosas excavadas y la suma de bloques y tratamientos, el promedio y la suma total están resaltados en negrita.

Tabla 38. *Diseño de bloques completamente al azar – Máxima densidad seca del suelo*

BLOQUES	TRATAMIENTOS				Σ Trat
	T0 (Suelo 100%)	T1 (Suelo 80%+20%CCV)	T2 (Suelo 75%+25%CCV)	T3 (Suelo 70%+30%CCV)	
1	1.829	1.834	1.816	1.842	7.32
2	1.847	1.841	1.830	1.850	7.368
3	1.826	1.841	1.821	1.842	7.33
Σ Bloque:	5.50	5.52	5.47	5.53	22.02
MEDIA :	1.83	1.84	1.82	1.84	

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se muestran los valores para la obtención de parámetros.

$$\begin{aligned}n &= 3 \\T &= 4\end{aligned}$$

A continuación, se muestran los cálculos correspondientes para armar la tabla de análisis de varianza correspondiente al diseño de bloques completamente al azar.

Sumatoria total y promedio general

$$\begin{aligned}\sum Total &= 22.02 \\Promedio general &= 1.83\end{aligned}$$

- Factor de corrección

$$\begin{aligned}Fc &= \frac{X^2}{n * T} \\Fc &= 40.40\end{aligned}$$

- Suma de cuadrados del total

$$\begin{aligned}SCT &= \sum (x_{ij}^2) - Fc \\SCT &= 0.00124\end{aligned}$$

- Suma de cuadrados de los bloques

$$\begin{aligned}SCB &= \frac{\sum x_j^2}{T} - Fc \\SCB &= 0.00031\end{aligned}$$

- Suma de cuadrados de los tratamientos

$$\begin{aligned}SCT &= \frac{\sum x_i^2}{n} - Fc \\SCT &= 0.00080\end{aligned}$$

- Suma de cuadrados del error

$$\begin{aligned}SCE &= SCTotal - (SCB + SCT) \\SCE &= 0.00012\end{aligned}$$

- Cálculo de cuadrados medios

- Cuadrado medio de los bloques

$$CMB = \frac{SCB}{gl. B}$$

$$\begin{aligned} gl \text{ Bloque} = glB &= 2 \\ CMB &= 0.00016 \end{aligned}$$

- Cuadrado medio de los tratamientos

$$CMT = \frac{SCT}{gl_T}$$

$$\begin{aligned} gl \text{ Tratamiento} = glT &= 3 \\ CMT &= 0.00027 \end{aligned}$$

- Cuadrado medio del error

$$CME = \frac{SCE}{gl_E}$$

$$\begin{aligned} gl \text{ Error} = glE &= 6 \\ CME &= 0.00002 \end{aligned}$$

La tabla muestra, el análisis de varianza del diseño de bloques completamente al azar, para los resultados de la máxima densidad seca del suelo arcilloso.

Tabla 39. *Análisis de varianza – Máxima densidad seca del suelo*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	F (Fc) calculado	F (Ft) tabulado (α=0.05)
Bloques	0.00031	2.00	0.00016	7.60	5.14
Tratamientos	0.00080	3.00	0.00027	13.11	4.76
Error	0.00012	6.00	0.00002		
Total	0.00124	11.00			

Fuente: Elaboración propia

Interpretación del análisis de varianza:

De acuerdo al análisis de varianza el valor de $F_c = 7.60$ y $F_t = 5.14$, con $gl_1=2$ y $gl_2=6$, se entiende que existe diferencia significativa entre las medias de los bloques a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por lo tanto, se puede decir que la máxima densidad seca del suelo arcilloso con la adición de ceniza de carbón vegetal en las proporciones de 20%;

25% y 30%, es estadísticamente diferente en las calicatas 1 al 3. En cuanto a los tratamientos; el valor $F_c = 13.11$ y $F_t = 4.76$, con $gl_1=3$ y $gl_2=6$ se deduce que existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por lo que, se acepta la hipótesis alterna y se puede decir que la adición de ceniza de carbón vegetal en diferentes proporciones influye significativamente en la máxima densidad seca del suelo arcilloso aplicado a subrasantes.

Así mismo, se realizó la prueba de Tukey, para determinar la diferencia de medias de los resultados de la máxima densidad seca del suelo arcilloso, sin ceniza y con ceniza de carbón vegetal. La prueba se realizó con el programa SPSS 23.

Tabla 40. Prueba de Tukey – Bloques – Máxima densidad seca del suelo

Máxima_densidad_seca

HSD Tukey^{a,b}

Bloques	N	Subconjunto	
		1	2
1,00	4	1,83025	
3,00	4	1,83250	1,83250
2,00	4		1,84200
Sig.		,771	,057

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 2,047E-5.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

b. Alfa = 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Prueba de Tukey – Tratamientos – Máxima densidad seca del suelo

Máxima_densidad_seca

HSD Tukey^{a,b}

Tratamientos	N	Subconjunto	
		1	2
3,00	3	1,82233	
1,00	3	1,83400	1,83400
2,00	3		1,83867
4,00	3		1,84467
Sig.		,071	,098

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 2,047E-5.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

b. Alfa = 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Interpretación de la prueba de Tukey:

La prueba de Tukey, se realiza para determinar la diferencia de las medias, cuando estas tienen valores cercanos. Es así que, el bloque 1 y 3 correspondientes a las calicatas 1 y 3, tienen medias de máxima densidad seca del suelo similares; por otro lado, las medias del bloque 2 y 3 también son similares. Lo cual, indica que la máxima densidad seca obtenida en las 3 calicatas, es similar en los tres casos.

El escenario de los tratamientos, muestra que las medias de la máxima densidad seca de los tratamientos 1 (Suelo al 100%) y 3 (Suelo 75% + 25% CCV) son similares por la cercanía de sus valores. Mientras que, los tratamientos 1 (Suelo al 100%); 2 (Suelo 80% +

20% CCV) y 4 (Suelo 70% + 30% CCV) también tienen medias de máxima densidad seca, similares por la cercanía de sus valores obtenidos.

Debido a que la prueba de hipótesis evidenció que, la máxima densidad seca del suelo es significativamente diferente, en cuanto a la adición de ceniza de carbón vegetal en proporciones del 0%; 20%; 25% y 30%. Quedó demostrado estadísticamente que la adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la máxima densidad seca del suelo arcilloso aplicado a subrasantes.

4.2.4. Adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de soporte del suelo arcilloso

Para la capacidad de resistencia del suelo arcilloso, se plantearon las siguientes hipótesis.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

Se muestra la tabla del diseño de bloques completamente al azar, donde el número de bloques se refiere a las calicatas realizadas, también se puede observar la sumatoria de bloques y tratamientos, promedio y la sumatoria total en negrita.

Tabla 42. Diseño de bloques completamente al azar – Capacidad de resistencia del suelo

BLOQUE	TRATAMIENTOS				Σ Trat
S	T0 (Suelo 100%)	T1 (Suelo 80%+20%CCV)	T2 (Suelo 75%+25%CCV)	T3 (Suelo 70%+30%CCV)	
1	3.00	22.50	35.40	37.60	98.50
2	3.10	21.80	34.90	37.50	97.3
3	2.60	23.30	34.80	34.80	95.5
Σ Bloque:	8.70	67.60	105.10	109.90	291.30
MEDIA :	2.90	22.53	35.03	36.63	

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se muestran los valores para la obtención de parámetros.

$$n = 3$$

$$T = 4$$

A continuación, se muestran los cálculos correspondientes para armar la tabla de análisis de varianza correspondiente al diseño de bloques completamente al azar, para los resultados de la capacidad de resistencia del suelo arcilloso.

- Sumatoria total y promedio general

$$\sum Total = 291.30$$

$$Promedio\ general = 24.28$$

- Factor de corrección

$$Fc = \frac{X^2}{n * T}$$

$$Fc = 7,071.31$$

- Suma de cuadrados del total

$$SCT = \sum (x_{ij}^2) - Fc$$

$$SCT = 2,191.70$$

- Suma de cuadrados de los bloques

$$SCB = \frac{\sum x_j^2}{T} - Fc$$

$$SCB = 1.14$$

- Suma de cuadrados de los tratamientos

$$SCT = \frac{\sum x_i^2}{n} - Fc$$

$$SCT = 2,185.18$$

- Suma de cuadrados del error

$$SCE = SCTotal - (SCB + SCT)$$

$$SCE = 5.38$$

- Cálculo de cuadrados medios

- Cuadrado medio de los bloques

$$CMB = \frac{SCB}{gl. B}$$

$$\begin{aligned} \text{gl Bloque} &= \text{glB} \\ &= 2 \\ \text{CMB} &= 0.57 \end{aligned}$$

- Cuadrado medio de los tratamientos

$$\begin{aligned} \text{gl Tratamiento} &= \frac{SCT}{gl_T} \\ &= 3 \\ \text{CMT} &= 728.39 \end{aligned}$$

- Cuadrado medio del error

$$\begin{aligned} \text{gl Error} &= \frac{SCE}{gl_E} \\ &= 6 \\ \text{CME} &= 0.90 \end{aligned}$$

La tabla muestra, el análisis de varianza del diseño de bloques completamente al azar, para la capacidad de soporte del suelo.

Tabla 43. *Análisis de varianza – Capacidad de resistencia del suelo*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrados medios	F calculado	(Fc)	F tabulado (α=0.05)	(Ft)
Bloques	1.14	2.00	0.57	0.64		5.14	
Tratamientos	2,185.18	3.00	728.39	812.34		4.76	
Error	5.38	6.00	0.90				
Total	2,191.70	11.00					

Fuente: Elaboración propia

Interpretación del análisis de varianza:

De acuerdo al análisis de varianza el valor de $F_c = 0.64$ y $F_t = 5.14$, con $gl_1=2$ y $gl_2=6$, se entiende que no existe diferencia significativa entre las medias de los bloques a un

nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por lo tanto, se infiere que la capacidad de resistencia del suelo arcilloso con la adición de ceniza de carbón vegetal en las proporciones de 20%; 25% y 30%, no varía o es similar en las calicatas 1 al 3. En cuanto a los tratamientos; el valor $F_c = 812.34$ y $F_t = 4.76$, con $gl_1=3$ y $gl_2=6$ se deduce que existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por lo que, se acepta la hipótesis alterna y se puede decir que la adición de ceniza de carbón vegetal en diferentes proporciones influye significativamente en la capacidad de resistencia del suelo arcilloso aplicado a subrasantes.

Así mismo, se realizó la prueba de Tukey, para determinar la diferencia de medias de la capacidad de resistencia del suelo arcilloso, sin ceniza y con ceniza de carbón vegetal. La prueba se realizó con el programa SPSS 23.

Tabla 44. Prueba de Tukey – Bloques – Capacidad de resistencia del suelo
Capacidad de resistencia del suelo - CBR

HSD Tukey^{a,b}

Bloques: calicatas	N	Subconjunto
		1
2,00	4	24,3250
1,00	4	24,6250
3,00	4	24,8250
Sig.		,433

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,284.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

b. Alfa = 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Prueba de Tukey – Tratamientos – Capacidad de resistencia del suelo

Capacidad de resistencia del suelo - CBR

HSD Tukey^{a,b}

Tratamientos	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
1,00	3	2,9000			
2,00	3		22,5333		
3,00	3			35,0333	
4,00	3				37,9000
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,284.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

b. Alfa = 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Interpretación de la prueba de Tukey:

La prueba de Tukey, se realiza para determinar la diferencia de las medias, cuando estas tienen valores cercanos. Es así que, el bloque 1; 2 y 3 correspondientes a las calicatas 1; 2 y 3, tienen medias de capacidad de resistencia del suelo similares. El escenario es diferente con los tratamientos, ya que el resultado demostró que la capacidad de soporte del

suelo es significativamente diferente, en cuanto a la adición de ceniza de carbón vegetal en proporciones del 0%; 20%; 25% y 30%. Con lo que se demostró estadísticamente que la adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la capacidad de soporte del suelo arcilloso aplicado a subrasantes.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados

5.1.1. Adición de ceniza de carbón vegetal en el tipo de suelo arcilloso

La tabla 13, correspondiente al resumen de granulometría del suelo al 100% de la calicata 1, describe que la muestra contiene material del tipo arena y finos, en la proporción del 18.9% y 81.1% respectivamente. En cuanto a la figura 9, que representa la distribución granulométrica del suelo al 100%; se puede observar que el material pasa directamente por los tamices N°8 al N°80, evidenciando el material fino de la muestra para este caso. La descripción de la muestra, señala el tipo de suelo CL según la clasificación SUCS y el tipo A – 7 – 6 según la clasificación AASHTO.

También se tiene la tabla 14; que contiene el resumen del ensayo de granulometría correspondiente al tratamiento 1, suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal, donde se observa claramente el incremento del contenido de material del tipo arena en la proporción de 21.9% junto a una proporción de finos del 78.1%. La figura 10, muestra la curva granulométrica del tratamiento 1, donde se puede apreciar el incremento de partículas del tamaño de arenas. La descripción de la muestra, evidencia un tipo de suelo CL y A – 7 – 6; según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

Según la tabla 15, que representa el resumen del ensayo de granulometría para el tratamiento 2, suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal, se puede observar el 23.4% de contenido de arena y 76.6% de finos de la muestra para el tratamiento mencionado, correspondiente a la calicata 1. Así mismo, la figura 11, representa la curva granulométrica del tratamiento 2, en la que también se puede apreciar el incremento de partículas del tamaño de arenas. La descripción de la muestra, evidencia un tipo de suelo CL y A – 7 – 6 según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

La tabla 16, correspondiente al resumen de la granulometría del tratamiento 3, suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal, describe que para este tratamiento la cantidad de arena fue de 24.4% y la cantidad de finos fue de 75.6%. Así mismo, la curva granulométrica de la figura 12, evidencia el incremento de partículas del tamaño de arenas en dicha muestra. La descripción de la muestra, evidencia un tipo de suelo ML y A – 7 – 6 según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

De acuerdo a la descripción de los resultados correspondientes al tipo de suelo de la calicata 1, es posible decir que el tipo de suelo mejora ligeramente con el incremento de la proporción de ceniza de carbón vegetal. Ya que se pasó de un suelo tipo arcilloso (sin adición de ceniza de carbón vegetal) a uno limoso con la adición del 30% de ceniza de carbón vegetal.

La tabla 17, correspondiente al resumen de granulometría para el tratamiento 0 (suelo al 100%) de la calicata 2, muestra el contenido de arenas de 14.2% y finos del 85.8%. Así mismo, la figura 13 representa la curva granulométrica del tratamiento 0, donde se puede apreciar que el material tiene mayor proporción de finos. La descripción de la muestra, señala

un tipo de suelo CL y A – 7 – 6 (arcilla inorgánica) según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

Según la tabla 18, de resumen de granulometría del tratamiento 1 (Suelo 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal), describe que el contenido de arenas fue de 24.7% y el contenido de finos fue de 75.3%, haciendo un total de 100% del material. La figura 14, correspondiente a la curva granulométrica, evidencia el incremento de partículas del tamaño de arenas. Y la descripción de la muestra observada en laboratorio, indica un tipo de suelo ML y A – 7 – 6 (limo arcilloso inorgánico) según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

La tabla 19, que muestra el resumen de la granulometría para el tratamiento 2 (suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal), muestra el contenido de arenas del 20.2% y finos del 79.8%. La curva granulométrica del tratamiento, que se encuentra en la figura 15, también evidencia el incremento de partículas del tamaño de arenas finas. La descripción de la muestra, señala un tipo de suelo CL y A – 7 – 6 (arcilla inorgánica) según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

También se tiene la tabla 20, correspondiente al resumen de la granulometría del tratamiento 3 (suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal), muestra que el contenido de arenas fue el 22.9% y el contenido de finos fue el 77.1%, sumando en total 100% del material ensayado. Así mismo, la figura 16 que representa la distribución granulométrica del tratamiento 3, evidencia el incremento de partículas del tamaño de arenas finas. Y la descripción de la muestra, indica un tipo de suelo CL y A – 7 – 6 (arcilla inorgánica) según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

De acuerdo a la descripción de los resultados del tipo de suelo correspondiente a la calicata 2, se puede decir que el suelo mejora de tipo con la adición de ceniza de carbón

vegetal al 20% ya que la clasificación según SUCS obtenida fue ML correspondiente a un suelo limo arcilloso inorgánico.

La tabla 21, en la que se encuentra el resumen de granulometría correspondiente al tratamiento 0 (suelo al 100%) de la calicata 3; se obtuvo la proporción de arenas igual al 9.6% y la proporción de finos fue del 90.4%. En la figura 17, se muestra la distribución granulométrica del tratamiento 0, donde se puede apreciar que la mayor proporción el material ensayado es fino. Y en la descripción del material se evidenció el tipo de suelo CH y A – 7 – 6 (arcilla limosa inorgánica) según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

En la tabla 22, de resumen de granulometría del tratamiento 1 (suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal), se obtuvo la cantidad de arena igual a 23.5% y finos igual a 76.5%. Así mismo, la figura 18 de la curva granulométrica del tratamiento evidencia el incremento de partículas del tamaño de arenas finas. La descripción del material, indica un tipo de suelo CL y A – 7 – 6 (arcilla inorgánica) según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

También se tiene la tabla 23, correspondiente al resumen de granulometría del tratamiento 2 (suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal), muestra que el contenido de arenas fue el 22.0% y el contenido de finos fue el 78.0%. Así mismo, la figura 19 que representa la distribución granulométrica del tratamiento, evidencia el incremento de partículas del tamaño de arenas finas. La descripción de la muestra, señala un tipo de suelo CL y A – 7 – 6 (arcilla inorgánica) de acuerdo a la clasificación SUCS y AASHTO.

La tabla 24, correspondiente al resumen de granulometría del tratamiento 3 (suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal) de la calicata 3, muestra que el contenido de arenas fue igual a 23.6% y el contenido de finos fue de 76.4%, sumando un total de 100% del

material ensayado. La figura 20, que representa la curva granulométrica del tratamiento, evidencia el incremento de partículas del tamaño de arenas finas. Y la descripción del material señala el tipo de suelo CL y A – 7 – 6 (arcilla limosa inorgánica) según la clasificación SUCS y AASHTO respectivamente.

De acuerdo a los resultados descritos, correspondiente al tipo de suelo de la calicata 3, es posible mencionar que el suelo mejora de tipo con el incremento de la adición de ceniza de carbón vegetal; ya que se logra pasar de un suelo arcillo limoso inorgánico a un suelo del tipo arcilloso inorgánico.

Del mismo modo, es necesario mencionar que la investigación cuenta con el aporte del antecedente de Cañar (2017) donde el suelo del estudio estuvo compuesto por arcillas de alta de plasticidad como la de la investigación mejora sus características y comportamiento en la capacidad de soporte del suelo incrementando los valores de CBR con la adición de cenizas de carbón.

Así mismo, se tiene el antecedente de Cobos y otros (2019) donde el suelo obtenido fue MH (limo orgánico) que al adicionar ceniza de cisco de café y cáscara de coco mejoraron su comportamiento en la compactación y capacidad de soporte del suelo de origen volcánico.

5.1.2. Adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural del suelo arcilloso

Según la figura 21, en la que se presentaron los resultados del contenido de humedad natural de la calicata 1. Se puede apreciar que la humedad natural disminuye con el incremento de ceniza de carbón vegetal, hasta en un 25% de dicha ceniza; es así que para el suelo al 100% se tuvo 22.40% de humedad, para el tratamiento 1 (suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal) la humedad natural fue 19.90%, para el tratamiento 2 (suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal) la humedad natural fue 17.59%, a diferencia del

tratamiento 3 (suelos al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal) en el que obtuvo 19.72% de humedad.

La figura 22, presenta los resultados del contenido de humedad natural de la calicata 2. Se observa que, el contenido de humedad del suelo al 100% fue de 19.96%, para un suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal el contenido de humedad fue de 20.08%, para un suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal el contenido de humedad fue 20.09% y para un suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal el contenido de humedad fue 19.91%. De acuerdo a lo mencionado, se aprecia que el contenido de humedad natural disminuyó con la ceniza al 30%.

La figura 23 ilustra el contenido de humedad natural de la muestra de suelo del pozo de prueba 3. Se determinó que el contenido de humedad de una muestra de suelo al 100% era del 19,26%, el de una muestra de suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal era del 20,08%, y el de una muestra de suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal era del 17,10%. La adición de un 30% de ceniza de carbón vegetal reduce el contenido de humedad del suelo en el pozo de prueba 3 de acuerdo con lo anterior.

De acuerdo con los datos obtenidos para el contenido de humedad en las fosas 1 a 3, es factible concluir que la ceniza de carbón vegetal en una concentración del 30% reduce el contenido de humedad del suelo; sin embargo, la ceniza de carbón vegetal en concentraciones del 20% y el 25% no asegura una disminución del contenido de humedad del suelo.

En cuanto a la comprobación de las hipótesis, es importante señalar que se utilizó un diseño de bloques totalmente aleatorizados para comprobar la hipótesis de que la adición de cenizas de carbón vegetal tiene un efecto sustancial en el contenido de humedad del suelo.

En primer lugar, se obtuvo el análisis de varianza, donde los valores de F_c (F calculado) para los bloques (calicatas 1; 2 y 3) y tratamientos (T0; T1; T2; T3) fueron menores a los valores F_t (F tabulado); del cual se deduce que, la adición de ceniza de carbón vegetal en las proporciones del 20%; 25% y 30% no influyen en el contenido de humedad del suelo en las tres calicatas. Así mismo se realizó la prueba de Tukey, para determinar la diferencia de medias del contenido de humedad entre las tres calicatas; del cual también se obtuvo que las medias son similares y no varían tanto para bloques como para tratamientos. Los resultados similares de humedad natural señalan que los ensayos fueron realizados de forma uniforme en los tratamientos de cada calicata o bloque. Por lo que, queda demostrado que la adición de ceniza de carbón vegetal no afecta considerablemente el contenido de humedad del suelo.

5.1.3. Adición de ceniza de carbón vegetal en el índice de plasticidad del suelo arcilloso

En la tabla 25, se presentaron los resultados del índice de plasticidad del suelo arcilloso, de la calicata 1. En dicha tabla, se puede apreciar que el índice de plasticidad fue calculado de la diferencia del límite líquido y límite plástico. Es así que, en la figura 24 se adjunta la representación gráfica del índice de plasticidad del suelo, en la que se observó que el índice de plasticidad se reduce con el incremento de la adición de ceniza de carbón vegetal en las proporciones del 20% al 30%; ya que el índice de plasticidad del suelo al 100% fue 17.9 correspondiente a una plasticidad media según el cuadro 4.6 del capítulo de suelos del Manual de carreteras – sección suelos y pavimentos del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014) con la característica de un suelo arcilloso; para un suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal el índice de plasticidad fue 18.9 correspondiente a una plasticidad media; para un suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal el índice de plasticidad fue 14.8 correspondiente también a una plasticidad media; y para un suelo al 70%

+ 30% de ceniza de carbón vegetal el índice de plasticidad fue 14.7 correspondiente a una plasticidad media.

Por otro lado, se tiene la tabla 26 en la que también se puede observar que el índice de plasticidad se obtuvo de la diferencia del límite líquido y plástico, para la calicata 2. En la figura 25, se puede observar que el índice de plasticidad disminuye considerablemente; ya que para el suelo al 100% el índice de plasticidad fue 20.3 correspondiente a una plasticidad alta y característico de suelos muy arcillosos, y cuando al suelo se le adicionó el 20% de ceniza de carbón vegetal se obtuvo el valor de 14.9 correspondiente a una plasticidad media. A diferencia de cuando, al suelo se le adicionó 25% de ceniza el índice de plasticidad fue 18.0 correspondiente a una plasticidad media; y cuando al suelo se le adicionó el 30% de ceniza de carbón vegetal el índice de plasticidad fue 15.7. De acuerdo a lo mencionado, se puede decir que la adición de ceniza de carbón vegetal no reduce gradualmente el índice de plasticidad del suelo en la calicata 2.

También se presentó la tabla 27 que contiene los resultados del índice de plasticidad de la calicata 3, en la que se también se muestra que el índice de plasticidad se obtuvo de la diferencia del límite líquido y plástico. En la figura 26, se puede observar que el índice de plasticidad disminuye considerablemente con el incremento de ceniza de carbón vegetal. Ya que para el suelo al 100% el índice de plasticidad fue 30.0 correspondiente a una plasticidad alta típico de suelos muy arcillosos; para un suelo al 80% con 20% de ceniza de carbón vegetal, el índice de plasticidad fue 15.8 correspondiente a una plasticidad media típico de suelos arcillosos; para un suelo al 75% con 25 % de ceniza de carbón vegetal, el índice de plasticidad fue 17.6 correspondiente a una plasticidad media; y para un suelo al 70% con 30% de ceniza de carbón vegetal, el índice de plasticidad fue 15.2 correspondiente a un suelo con plasticidad media.

Según lo dicho en los párrafos anteriores, la adición de cenizas de carbón vegetal disminuye el índice de flexibilidad del suelo arcilloso, transformándolo de un suelo muy arcilloso a un suelo arcilloso.

Del mismo modo, se utilizó un diseño de bloques totalmente aleatorizados para probar la hipótesis de que la adición de cenizas de carbón vegetal afecta considerablemente al índice de plasticidad del suelo arcilloso. Se obtuvo el análisis de varianza, donde los valores de F_c (F calculado) para bloques (calicatas) y tratamientos (T0; T1; T2 y T3) fueron menores a los valores F_t (F tabulado); lo que señala que el índice de plasticidad del suelo arcilloso con adición de ceniza de carbón vegetal es igual en las tres calicatas y los tratamientos respectivos. A continuación, se utilizó la prueba de Tukey para examinar la diferencia entre las medias, que reveló que la ceniza de carbón vegetal no tiene un efecto significativo sobre el índice de plasticidad del suelo arcilloso, ya que las medias de los tratamientos y los bloques eran comparables.

De acuerdo con el antecedente de Bueno y otros (2019) En las regiones en las que se utilizaron cenizas de carbón para estabilizar el suelo, el índice de plasticidad se redujo y el comportamiento del suelo mejoró en las pruebas de compactación y capacidad portante, siendo el porcentaje del 5% el que dio los mejores resultados. *Es así que en la investigación se obtuvo de igual forma la disminución y conservación de la plasticidad media conforme a la adición de ceniza de carbón.*

5.1.4. Adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca del suelo arcilloso

Según la Figura 27, que representa los resultados de la densidad seca máxima de la fosa de ensayo 1 en la que se aplicaron los tratamientos 0, 1, 2 y 3, se puede observar que la

densidad seca máxima aumenta con la adición de ceniza de carbón vegetal, siendo la muestra 3 de todos los tratamientos la que presenta los valores más altos de densidad seca del suelo. Ya que en el tratamiento 0 (suelo al 100%) la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.708 gr/cm³ a 1.829 gr/cm³, en el tratamiento 1 (suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal) la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.740 gr/cm³ a 1.825 gr/cm³, en el tratamiento 2 (suelos al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal) la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.698 gr/cm³ a 1.809 gr/cm³, y en el tratamiento 3 (suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal) la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.735 gr/cm³ a 1.835 gr/cm³.

La figura 28 muestra el contenido óptimo de humedad de la fosa de prueba 1, donde también se descubrió que el nivel óptimo de humedad aumentaba con la adición de ceniza de carbón vegetal, y la muestra 4 de todos los tratamientos presentaba el máximo contenido de humedad. Ya que para un suelo al 100% el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 9.9% y 16.2%; para un suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal, el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 11.9% y 17.5%; para un suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal, el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 12.1% y 18.2%; y para un suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal, el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 10.6% y 16.3%. Como se mencionó en el párrafo anterior, los valores más altos de la máxima densidad seca fueron de la muestra 3 para todos los tratamientos y así mismo el óptimo contenido de humedad también corresponde a la muestra 3 de todos los tratamientos. Como muestra de ello, se tuvo que en el tratamiento 3 (suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal) la máxima densidad seca fue 1.835 gr/cm³, al cual le corresponde 14.5% de óptimo contenido de humedad.

La figura 29 muestra los valores más altos de densidad seca relacionados con la fosa de prueba 2. Se puede mostrar que la adición de ceniza de carbón vegetal aumenta la densidad seca máxima y que la muestra 3 de todos los tratamientos tenía los mayores valores de densidad seca. Ya que en el tratamiento 0 (suelo al 100%) la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.680 gr/cm³ a 1.838 gr/cm³, en el tratamiento 1 (suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal) la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.740 gr/cm³ a 1.825 gr/cm³, en el tratamiento 2 (suelos al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal) la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.710 gr/cm³ a 1.824 gr/cm³, y en el tratamiento 3 (suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal) la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.748 gr/cm³ a 1.845 gr/cm³.

En la figura 30, donde se muestran los resultados del óptimo contenido de humedad de la calicata 2, se observó que el contenido de humedad se incrementa respecto a la adición de ceniza de carbón vegetal y también la muestra 3 de todos los tratamientos presentó los valores más altos de contenido de humedad. Pues para un suelo al 100% el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 13.7% y 22.2%; para un suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal, el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 10.6% y 16.6%; para un suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal, el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 11.4% y 17.8%; y para un suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal, el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 9.7% y 15.1%. Como se mencionó en el párrafo anterior, los valores más altos de la máxima densidad seca fueron de la muestra 3 para todos los tratamientos y así mismo el óptimo contenido de humedad también corresponde a la muestra 3 de todos los tratamientos. Como muestra de ello, se tuvo que en el tratamiento 3 (suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal) la máxima densidad seca fue 1.835 gr/cm³, al cual le corresponde 14.5% de óptimo contenido de humedad. Además

se debe mencionar que, en esta calicata 2, la muestra 4 de todos los tratamiento evidenció valores de máxima densidad seca inferiores y valores de óptimo contenido de humedad superiores, a las demás muestras.

La figura 31 también representa la densidad seca máxima del suelo, que corresponde a la fosa de ensayo 3. Se puede observar el aumento de la densidad seca máxima debido a la adición de cenizas de carbón vegetal, ya que la muestra 3 de todos los tratamientos tenía valores de densidad seca mayores que la muestra 4, que tenía valores de densidad seca menores. Ya que en el tratamiento 0 la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.691 gr/cm³ a 1.826 gr/cm³, en el tratamiento 1 la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.740 gr/cm³ a 1.829 gr/cm³, en el tratamiento 2 la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.698 gr/cm³ a 1.813 gr/cm³, y en el tratamiento 3 la máxima densidad seca se encontró entre los valores de 1.735 gr/cm³ a 1.835 gr/cm³.

La figura 32 muestra el nivel de humedad óptimo del suelo en el pozo de ensayo 3, así como el aumento del contenido de humedad debido a la adición de cenizas de carbón vegetal. Ya que para un suelo al 100% el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 14.3% y 20.8%; para un suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal, el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 11.9% y 17.5%; para un suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal, el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 12.1% y 18.2%; y para un suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal, el óptimo contenido de humedad tuvo valores entre 10.6% y 16.3%. Como se mencionó en el párrafo anterior, los valores más altos de la máxima densidad seca fueron de la muestra 3 para todos los tratamientos y así mismo el óptimo contenido de humedad también corresponde a la muestra 3. Como muestra de ello, se tuvo que en el tratamiento 3 (suelo al 70% + 30% de ceniza de

carbón vegetal) la máxima densidad seca fue 1.835 gr/cm^3 , al cual le corresponde 14.5% de óptimo contenido de humedad.

De acuerdo a los resultados mencionados en los párrafos anteriores, se puede decir que el tratamiento 3 de suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal obtuvo el mejor comportamiento en el ensayo de Proctor modificado ya que; la máxima densidad seca obtenida fue de 1.835 gr/cm^3 en las calicatas 1 y 3, y en la calicata 2 la máxima densidad seca obtenida fue 1.845 gr/cm^3 . Con el óptimo contenido de humedad de 14.5% en las calicatas 1 y 3, y 13.4% en la calicata 2.

En este caso concreto, la prueba de hipótesis se llevó a cabo con el fin de evaluar el impacto que la incorporación de cenizas de carbón vegetal tenía sobre la mayor densidad seca posible alcanzada por el suelo arcilloso. En la primera sección, el análisis de la varianza se obtuvo utilizando un diseño de bloques completamente aleatorizados. Los valores de F_c (F calculada) de los bloques (calicatas) y de los tratamientos fueron superiores a los valores de F_t (F tabulada), lo que sugiere que la máxima densidad seca del suelo con la adición de ceniza de carbón vegetal es diferente tanto en los bloques como en los tratamientos. Como resultado, se refuta la hipótesis nula y se demuestra que la inclusión de cenizas de carbón vegetal tiene un impacto sustancial en la densidad seca máxima del suelo arcilloso cuando se aplica a las subrasantes. A continuación, se llevó a cabo la prueba de Tukey para determinar si existía o no una diferencia significativa entre las medias. Los resultados de esta prueba revelaron que las medias de los bloques 3 y 1 son comparables, al igual que las de los bloques 3 y 2. En cuanto a las medias correspondientes a los tratamientos, se descubrió que los tratamientos 1 y 3 son comparables, mientras que los tratamientos 1; 2 y 4 también lo son. A continuación, se demostró que la densidad seca máxima del suelo arcilloso que se

aplicó a las subrasantes está fuertemente influenciada por la adición de cenizas de carbón vegetal mediante el uso de análisis estadísticos.

Así mismo, es necesario mencionar que la investigación cuenta con el aporte del antecedente de Cañar (2017) donde “se estabilizó suelos arenosos finos y arcillosos combinados con ceniza de carbón, en la que el suelo arcilloso combinado con ceniza incrementó el grado de compactación y mejoró el valor de soporte y resistencia al corte del suelo”. *De acuerdo con este antecedente, y los resultados de la investigación también se pueden observar la mejora de la máxima densidad seca conforme se adicionó la ceniza de carbón en las muestras de suelos de las tres calicatas.*

5.1.5. Adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de resistencia del suelo arcilloso

La tabla 28, muestra los resultados del CBR (capacidad de resistencia del suelo) al 95% de la máxima densidad seca, de la calicata 1, donde se aprecia el incremento del CBR. En la figura 33, se puede apreciar que para un suelo al 100% el CBR fue 3.00% correspondiente a una subrasante insuficiente, para un suelo al 80% con 20% de ceniza de carbón vegetal el CBR fue 22.50% correspondiente a una subrasante muy buena según el cuadro 4.11 del capítulo de suelos del Manual de carreteras – sección suelos y pavimentos del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014), para un suelo al 75% con 25% de ceniza de carbón vegetal el CBR fue 35.40% correspondiente a una subrasante excelente; y para un suelo al 70% con 30% de ceniza de carbón vegetal el CBR fue 37.60%, correspondiente a una subrasante excelente.

En la tabla 29, se muestran los resultados del CBR al 100% de la máxima densidad seca, para la calicata 1; en la que se parecía el incremento del CBR conforme la adición de

ceniza de carbón vegetal. En la figura 34; el CBR para el suelo al 100% fue 4.20%, correspondiente a una subrasante insuficiente; para un suelo al 80% + 20% de ceniza de carbón vegetal el CBR fue 29.10% y que corresponde a una subrasante muy buena; para un suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal, el CBR fue 50.80% correspondiente a una subrasante excelente; y para un suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal, el CBR fue 53.30% correspondiente a una subrasante excelente.

En la figura 35, se muestran los resultados del CBR al 95% de la máxima densidad seca, para la calicata 2. Se observa que; para el tratamiento 0, el CBR obtenido fue 3.10% (subrasante insuficiente); para el tratamiento 1, el CBR fue 21.80% (subrasante muy buena); para el tratamiento 2, el CBR fue 34.90% (subrasante excelente); y para el tratamiento 3, el CBR fue 37.50% (subrasante excelente). Así mismo se tiene la figura 36, con los resultados del CBR al 100% de la máxima densidad seca, donde el CBR fue 4.80% para el tratamiento 0; para el tratamiento 1, el CBR fue 28.50% (subrasante buena); para el tratamiento 2, el CBR fue 49.90% (subrasante excelente); y para el tratamiento 3, el CBR fue 53.20% (subrasante excelente).

La figura 37, muestra los resultados del CBR al 95% de la máxima densidad seca, para la calicata 3. Se observa que; para el tratamiento 0, el CBR obtenido fue 2.60% (subrasante inadecuada); para el tratamiento 1, el CBR fue 23.30% (subrasante muy buena); para el tratamiento 2, el CBR fue 34.80% (subrasante excelente); y para el tratamiento 3, el CBR fue 38.60% (subrasante excelente). En la figura 38, se muestran los resultados del CBR al 100% de la máxima densidad seca, donde el CBR fue 3.80% (subrasante insuficiente) para el tratamiento 0; para el tratamiento 1, el CBR fue 29.90% (subrasante buena); para el tratamiento 2, el CBR fue 50.60% (subrasante excelente); y para el tratamiento 3, el CBR fue 53.50% (subrasante excelente) según el cuadro 4.11 de categorías de subrasante del

Manual de carreteras – sección suelos y pavimentos del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).

De acuerdo a los resultados mencionados en los párrafos anteriores, el CBR al 95% de la máxima densidad seca del suelo arcilloso, se incrementa respecto a la adición de ceniza de carbón vegetal en cada tratamiento, pues se observó que la subrasante pasa de ser insuficiente a excelente con la adición de ceniza al 30%. Y en cuanto a los resultados del CBR al 100% de la máxima densidad seca, los valores se incrementaron a mayor escala, donde también se observó que la subrasante pasa de ser insuficiente a excelente según las categorías de subrasante propuestas en el Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos del (MTC, 2014). Además, se debe destacar que, conforme a los resultados del ensayo de Proctor modificado, fue el tratamiento 3 (suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal) el que demostró un mayor valor en la máxima densidad seca con un óptimo contenido de humedad entre 13.4% y 14.5%; y en este ensayo de CBR en laboratorio también fue el tratamiento 3 que obtuvo los mayores valores de CBR al 95% y 100% de la máxima densidad seca del suelo.

Del mismo modo, se probó la hipótesis y se utilizó un diseño de bloques totalmente aleatorizados para analizar los datos con el fin de averiguar cómo la adición de cenizas de carbón vegetal afectaba a la capacidad de resistencia del suelo arcilloso. Se obtuvo el análisis de varianza, donde el valor F_c (F calculado) de los bloques o calicatas fue menor al valor F_t (F tabulado), del cual se infiere que la capacidad de soporte obtenida en las tres calicatas fue igual. En cuanto a los tratamientos el valor F_c fue mayor al valor F_t , del cual se deduce que existe diferencia significativa entre los resultados de la capacidad portante de los tratamientos. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa y se puede afirmar que la

incorporación de cenizas de carbón vegetal en suelos arcillosos afecta en gran medida a la capacidad de resistencia del suelo cuando se aplica a las subrasantes.

Posteriormente se realizó la prueba de Tukey, para determinar la diferencia de las medias de los resultados de la capacidad de resistencia del suelo. Se comprobó que las medias de los bloques o fosas eran las mismas, y se encontró que cada uno de los tratamientos producía resultados diferentes. Esto indica que lo afirmado en el párrafo anterior es exacto, y se ha demostrado estadísticamente que la adición de cenizas de carbón vegetal influye en la capacidad de resistencia de los suelos arcillosos cuando se aplica a las subrasantes.

Los resultados de la investigación, tienen respaldo en los antecedentes de la investigación; es así que en las siguientes líneas se describen los antecedentes que respaldan la investigación.

En la tesis “Análisis comparativo de la resistencia al corte y estabilización de suelos arenosos finos y arcillosos combinadas con cenizas de carbón”, de Cañar (2017). En esta investigación se utilizaron las proporciones de 20%; 23% y 25% de ceniza de carbón, donde los valores de soporte fueron 18.6%; 19.1% y 19.6% respectivamente para un suelo compuesto por arenas limosas y para un suelo arcilloso de alta plasticidad los valores de soporte fueron 9.8%; 10.0% y 11.20% respectivamente. Es así que, en la conclusión se mencionó que la proporción del 25% de ceniza de carbón vegetal influye favorablemente en suelos expansivos como la arcilla ya que se incrementó el grado de compactación y se mejoró el valor soporte del suelo. *Hecho que también ocurre en la investigación, ya que la proporción de la ceniza e carbón vegetal al 25% presentó valores altos de compactación y el valor de CBR también se incrementó con la proporción de ceniza de carbón vegetal en un 30% para el suelo que estuvo compuesto por arcillas inorgánicas.*

De acuerdo con la tesis “Caracterización del comportamiento geotécnico de suelos de origen volcánico estabilizados con cenizas provenientes de cáscara de coco y cisco de café”, de Cobos y otros (2019). Donde mencionaron que “la adición de cenizas en las proporciones de 5%; 10%, 15% reduce la plasticidad del suelo tratado e incrementan los valores de CBR del suelo, ya que funcionan como conglomerantes que potencian las propiedades del suelo”. *Es así que, en la investigación la adición de ceniza de carbón vegetal también redujo el índice de plasticidad, se incrementó la máxima densidad seca y el CBR incrementó considerablemente conforme la adición de ceniza de carbón vegetal.*

También se tuvo el antecedente de la tesis “Estabilización de la subrasante con la incorporación de ceniza vegetal - Jauja”, de Apolinarez (2018); donde se incorporó la ceniza vegetal en las proporciones del 15% y 25%, en la que se determinó que la adición de ceniza vegetal al 35% permitió obtener CBR de 24.7% y 23.7% según a NTP y MTC, para subrasante respectivamente. *Es así que, en la investigación, también se puede comprobar que la adición de ceniza de carbón vegetal incrementa la capacidad de soporte del suelo, o también conocido como CBR, cumpliendo con los parámetros del MTC, para subrasante.*

CONCLUSIONES

1. La adición de ceniza de carbón vegetal en el tipo de suelo, según el ensayo de análisis granulométrico; permitió que el suelo con adición de ceniza de carbón vegetal pasara de

ser un suelo arcilloso inorgánico de mediana plasticidad a ser un suelo limo arcilloso inorgánico. Razón por la cual la adición de ceniza de carbón vegetal mejora el suelo arcilloso aplicado a subrasantes.

2. Respecto a la humedad natural del suelo arcilloso, se pudo observar que disminuyó con el incremento de la adición de carbón vegetal, y fue la proporción del 30% de ceniza que evidenció mayor disminución en la humedad natural del suelo. Así mismo, se debe mencionar que la prueba de hipótesis realizada indicó aceptar la hipótesis nula de que la adición ceniza de carbón vegetal no influye en la humedad natural del suelo ya que solo se redujo en un 2% aproximado la humedad natural del suelo arcilloso.
3. La adición de ceniza de carbón vegetal en el índice de plasticidad del suelo arcilloso, evidenció la reducción de este debido al incremento de la adición de ceniza, ya que el suelo alta plasticidad pasó a ser un suelo de plasticidad media. De la prueba de hipótesis, se aceptó la hipótesis nula de que, la adición de ceniza de carbón vegetal no influye en el índice de plasticidad; ya que no se logró reducir hasta una plasticidad baja el suelo.
4. De acuerdo a los resultados de adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca del suelo arcilloso, fue el tratamiento 2 de suelo al 75% + 25% de ceniza de carbón vegetal que presentó los valores más altos de máxima densidad seca con un óptimo contenido de humedad entre 13.4% y 14.5%. De la prueba de hipótesis, se aceptó la hipótesis alterna de que, la adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la máxima densidad seca del suelo arcilloso.
5. Para la adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de resistencia del suelo arcilloso, el tratamiento 3 con suelo al 70% + 30% de ceniza de carbón vegetal evidenció los valores más altos de CBR al 95% y 100% de la máxima densidad seca. Y de la prueba de hipótesis, se aceptó la hipótesis alterna de que, la adición de ceniza de carbón

vegetal influye significativamente en la capacidad de resistencia del suelo; debido a que la ceniza de carbón vegetal hizo que la subrasante insuficiente del suelo al 100%, pasara a ser una subrasante excelente con la adición de ceniza al 30%.

6. Como conclusión general, es posible decir que la adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en el suelo arcilloso aplicado a subrasantes; debido a que tuvo mayor influencia en la máxima densidad seca del suelo y la capacidad de soporte (CBR), en la que se logró obtener una subrasante excelente con el 30% de ceniza de carbón vegetal. Así mismo, se debe mencionar que la adición de ceniza de carbón vegetal en mayor proporción no garantizó obtener valores altos en el ensayo de máxima densidad seca.

RECOMENDACIONES

1. Referente al tipo de suelo, se recomienda emplear y revisar con más detalle la clasificación del suelo, tomando en cuenta el tamaño de partículas pasantes, el límite

líquido, plástico e índice de plasticidad. Para así observar con mayor claridad el efecto de la ceniza de carbón vegetal en el suelo arcilloso.

2. Respecto a la humedad natural del suelo arcilloso, se sugiere tener cuidado con la cantidad de material colocado en las taras, para evitar la pérdida de material dentro del horno de secado.
3. En cuanto al índice de plasticidad del suelo, se sugiere realizar los ensayos en función a los tratamientos planteados; con la finalidad de observar con más detalle el efecto de la ceniza de carbón vegetal en el índice de plasticidad del suelo. Ya que en la mayoría de las investigaciones la ceniza reduce la plasticidad de suelos finos, como el de la investigación.
4. Para el ensayo de Proctor modificado, que permitió obtener la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad del suelo; se recomienda cuidar del incremento de agua en intervalos para cuatro puntos y así obtener la curva de densidad seca máxima como en la investigación.
5. Respecto a la capacidad de resistencia o también conocido como CBR del suelo, se recomienda el uso de ceniza de carbón vegetal en la proporción del 30%, ya que mejora notablemente el valor de CBR del suelo arcilloso.
6. Finalmente, se recomienda utilizar la ceniza de carbón vegetal en la estabilización de suelos arcillosos a nivel del camino vecinal: Mishiyacu – La piedra, en el distrito Alexander Von Humbolth, del departamento de Ucayali, debido a la disponibilidad de la ceniza de carbón en la zona y a la mejora del terreno para que pueda ser utilizada con fines de pavimentación. Así mismo se recomienda, continuar con la investigación aplicando la ceniza en proporciones que tengan intervalos de 0.5% ó 1.0%, para observar con más detalle la tasa de incremento del CBR a nivel de subrasante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APOLINAREZ, A. 2018.** *Estabilización de la subrasante con la incorporación de ceniza vegetal - Jauja.* Huancayo, Perú : Universidad Peruana Los Andes, 2018.
- ARIZA, C, ROJAS, C y ROMERO, Y. 2017.** *Evaluación de la capacidad de soporte (CBR) de un suelo expansivo con adición de ceniza volante.* Bogotá, Colombia : Universidad La Gran Colombia , 2017.
- BERNAL, C. 2010.** *Metodología de la investigación: administración, economía. humanidades y ciencias sociales.* Colombia : s.n., 2010.
- BOGOTÁ, A. 2005.** *Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos.* Bogotá, Colombia : s.n., 2005.
- BRAJA, D. 2012.** Estabilización con ceniza muy fina. [aut. libro] Das BRAJA M. *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones.* México : CENGAGE Learning, 2012, 14, pág. 766.
- . 2012. Mejoramiento del suelo y modificaciones del terreno. *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones.* México : CENGAGE Learning, 2012.
- BUENO, J y TORRE, H. 2019.** *Mejoramiento de la estabilidad del suelo con cenizas de carbón con fines de pavimentación en el barrio del Pinar, Independencia, Huaraz - 2018.* Huaraz, Perú : Universidad César Vallejo, 2019.

- CAÑAR, E. 2017.** *Análisis comparativo de la resistencia al corte y estabilización de suelos arenosos finos y arcillosos combinadas con cenizas de carbón.* Ambato, Ecuador : Universidad Técnica de Ambato, 2017.
- CARRASCO, D. 2017.** *Estabilización de los suelos arcillosos adicionando cenizas de caña de azúcar en el tramo de Moro a Virahuanca en el Distrito de Moro – Provincia del Santa.* Chimbote, Perú : s.n., 2017.
- CASTRO, A. 2017.** *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante.* Lima, Perú : Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.
- CASTRO, E. 2016.** *Teoría y práctica de la investigación científica.* Huancayo, Perú : PERUGRAPH SRL, 2016. Propiedad del autor.
- COBOS, M, ORTEGON, C y PERALTA, J. 2019.** *Caracterización del comportamiento geotécnico de suelos de origen volcánico estabilizados con cenizas provenientes de cáscara de coco y cisco de café.* Ibagué, Colombia : Universidad Cooperativa de Colombia, 2019.
- CRESPO, C. 2008.** *Granulometría. Mecánica de suelos y cimentaciones.* México : LIMUSA S.A., 2008.
- . **2008.** *Plasticidad de los suelos. Mecánica de suelos y cimentaciones.* México : LIMUSA S.A., 2008.
- DÍAZ, F. 2018.** *Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara en la carretera Dv San Martín – Lonya Grande, Amazonas 2018.* Lima, Perú : Universidad César Vallejo, 2018.
- Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitosos.* **ALARCÓN, J, JIMÉNEZ, M y BENITEZ, R. 2020.** 1, Tunja, Colombia : Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2020, Revista ingeniería de construcción, Vol. 35, págs. 5 - 20.
- Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión).* **RIVERA, J, y otros. 2020.** Cali, Colombia : Universidad del Valle, 2020. DOI: 10.23850/22565035.2530.

- FONSECA y MONTEJO, A. 2006.** *Ingeniería de pavimentos*. Bogotá, Colombia : Stella Valbuena García, 2006.
- GONZÁLES, A. 2014.** Estabilización mecánica de suelos cohesivos a través de la utilización de cal - ceniza volante. Guatemala : s.n., 2014.
- GOÑAS, O. 2019.** *Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada* . Chachapoyas, Perú : Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, 2019.
- GUTIÉRREZ, C. 2010.** *Estabilización química de carreteras no pavimentadas en el Perú y ventajas comparativas del cloruro de magnesio (bischofita) frente al cloruro de calcio*. Lima, Perú : Universidad Ricardo Palma, 2010.
- GUTIÉRREZ, M. 2017.** *Gestión de carreteras no pavimentadas*. Madrid, España : Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- HERNÁNDEZ, R, FERNÁNDEZ, C y BAPTISTA, P. 2014.** *Metodología de la investigación*. México : McGraw-Hill, 2014. 978-1-4562-2396-0.
- Ingeniería Civil - Proyectos y apuntes teórico prácticos. 2010.** Ingeniería Civil - Estructura de los minerales de arcilla. *Ingeniería Civil - Estructura de los minerales de arcilla*. [En línea] 2010. [Citado el: 26 de Octubre de 2020.] <https://www.ingenierocivilinfo.com/2010/12/estructura-de-los-minerales-de-arcilla.html>.
- KRAEMER, C, y otros. 2004.** *Ingeniería de carreteras*. Madrid, España : McGraw-Hill, 2004.
- MAMANI, L y YATACO, A. 2017.** *Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de ayacucho*. Lima Perú : Universidad Sna Martín de Porres, 2017. pág. 198.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. 2014.** Capítulo IX - Estabilización de suelos. *Manual de carreteras - sección suelos y pavimentos*. Lima, Perú : Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2016.** *Manual de Ensayo de Materiales.* Lima, Perú : Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016.
- . **2014.** Capítulo III - Componentes de la infraestructura del camino. *Manual de carreteras. Sección suelos y pavimentos.* Lima, Perú : Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2014.** Capítulo IV - Suelos. *Manual de Carreteras - Sección suelos y pavimentos.* Lima, Perú : MTC - Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014.
- . **2014.** Capítulo IX - Estabilización de suelos. *Manual de carreteras - Sección suelos y pavimentos.* Lima, Perú : Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014.
- Ministerio del Ambiente. 2011.** *Memoria Descriptiva del Mapa de Vulnerabilidad Física.* Lima, Perú : s.n., 2011.
- MORALES, D. 2015.** *Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas.* Medellín, Colombia : Universidad de Medellín, 2015.
- PARRA, M. 2018.** *Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante.* Bogotá, Colombia : Universidad Católica de Colombia, 2018.
- PÉREZ, J y RIVERO, R. 2008.** *Evaluación de la capacidad cementante de la ceniza de caña y ceniza volante para suelos granulares limpios.* Bucaramanga, Colombia : s.n., 2008.
- QUINTERO, L y GALLARDO, A. 2015.** *Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización.* Ocaña, Colombia : Universidad Francisco de Paula Santander, 2015.
- RAE - Real Academia Española. 2005.** *Diccionario de la Lengua Española.* Lima, Perú : QUEBECOR WORLD PERÚ S.A., 2005. ISBN: 9972-58-138-1.
- RAMÍREZ, R. 2010.** *Proyecto de investigación. Cómo se hace una tesis.* Lima, Perú : Fondo Editorial AMADP. Lima, Perú, 2010. DERECHOS RESERVADOS.

- RUANO, D. 2012.** *Estabilización de suelos cohesivos por medio de arenas volcánicas y cal viva*. Guatemala : s.n., 2012.
- SÁNCHEZ, H y REYES, C. 2015.** *Metodología y diseños de la investigación científica*. Lima, Perú : Business Support Aneth, 2015. 978-612-46842-2-7.
- Studylib. 2019.** Tabla clasificación SUCS. *Tabla clasificación SUCS*. [En línea] 31 de Enero de 2019. <https://studylib.es/doc/8863139/tabla-clasificacion-sucs>.
- SUÁREZ, J. 1998.** Mejoramiento de la resistencia de suelos. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia : s.n., 1998.
- VALERO, L. 1978.** *Compactación en carreteras y aeropuertos*. Barcelona, España : Eyrolles, 1978.
- ZANS, J. 1975.** *Mecánica de suelos*. Barcelona, España : Eyrolles, 1975.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	MARCO TEÓRICO	HIPOTESIS	VARIABLE	METODOLOGÍA
<p>Problema general: ¿De qué manera influye la adición de ceniza de carbón vegetal en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020?</p>	<p>Objetivo general: Determinar la influencia de la adición de ceniza de carbón vegetal en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.</p>	<p>Antecedente nacional: Según (GOÑAS, 2019) en la tesis “Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada”, con el objetivo de evaluar la influencia de las cenizas de carbón en el mejoramiento de la propiedades mecánicas de muestras de suelo. La investigación se desarrolló con muestras de suelo de dos cuadros de la Calle Las Lomas, a las que se efectuaron los ensayos de humedad natural, granulometría, límites de consistencia, compactación Proctor estándar y capacidad de soporte (CBR) con adición de cenizas de carbón del 15%, 20% y 25%. Llegó a la conclusión de que las cenizas de carbón si mejorar la capacidad portante de suelos de tipo CH y OH, sin embargo los porcentajes de cenizas adicionadas no logran estabilizarlos según el manual de carreteras para ser usados como una subrasante mejorada</p>	<p>Hipótesis general: La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la estabilización de suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020.</p>	<p>Variable independiente Ceniza de carbón vegetal Dimensiones: • Adición de ceniza de carbón vegetal</p>	<p>Método: Científico Tipo: Aplicada Nivel: Explicativa Diseño: Experimental GE: O₁ x O₂ GC: O₃ T0: Tratamiento control T1: S + Ceniza 20% T2: S + Ceniza 25% T3: S + Ceniza 30%</p>
<p>Problemas específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿De qué manera afecta la adición de ceniza de carbón vegetal en la clasificación del suelo arcilloso aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020? • ¿De qué forma influye la adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020? • ¿De qué manera influye la adición de ceniza de carbón vegetal en el índice plasticidad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020? • ¿De qué manera altera la adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020? • ¿De qué forma afecta la adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020? 	<p>Objetivos específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluar de qué manera afecta la adición de ceniza de carbón vegetal en la clasificación del suelo arcilloso aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020. • Inferir la influencia de la adición de ceniza de carbón vegetal en la humedad natural de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020. • Evaluar la influencia de la adición de ceniza de carbón vegetal en el índice plasticidad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020? • Determinar de qué manera altera la adición de ceniza de carbón vegetal en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020. • Evaluar de qué forma afecta la adición de ceniza de carbón vegetal en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020. 	<p>Antecedente internacional: Según (MORALES, 2015), en la tesis “Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas”, con el objetivo de evaluar materiales estabilizantes alternativos para la red terciaria. Se analizó el efecto de la ceniza en las proporciones de 7%, 14% y 21% en diferentes tipos de suelos (arcilla, arenilla y material de la vía del Municipio de Urrao) mediante los ensayos de Proctor modificado y en el ensayo de resistencia a la compresión no confinada (UCS). Llegó a la conclusión de que la ceniza de carbón debe ser tamizada por la malla N°100 o mayor y usar hidróxido de sodio en solución como activador, para obtener un material cementante con características comparables con la norma INVIAS de Colombia.</p> <p>Marco teórico referencial:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ceniza. • Carbón vegetal. • Suelo. • Arcillas. • Suelo arcilloso. • Estabilización de suelos. 	<p>Hipótesis específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la clasificación del suelo arcilloso aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020. • La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la humedad natural de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020. • La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en el índice plasticidad de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020? • La adición de ceniza de carbón vegetal influye significativamente en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos aplicado a subrasantes en la provincia Padre Abad – Ucayali, en el 2020. 	<p>Variable dependiente Estabilización de suelos arcillosos Dimensiones: • Clasificación del suelo • Humedad natural • Índice de plasticidad • Máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad • Capacidad de soporte del suelo</p>	<p>Población y muestra: Población: La población está delimitada por los suelos arcillosos de las carreteras del departamento de Ucayali. Muestra: No probabilística, intencional conformada por 360 Kg de suelo arcilloso del camino vecinal Mishiyacu – La piedra – Alexander Von Humbolth – Padre Abad – Ucayali.</p> <p>Técnicas e instrumentos: No documental (Fichas de observación experimental) Técnicas de procesamiento de datos: Medidas de tendencia central Análisis de varianza Los análisis serán realizados con el software MS-Excel 2013</p>

Anexo 2: Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA	FUENTES	INSTRUMENTOS
Variable independiente: Ceniza de carbón vegetal	La ceniza muy fina es un subproducto de del proceso de combustión de carbón pulverizado, generalmente asociado con plantas de generación de energía eléctrica. Es un polvo de grano fino que está compuesto por sílice, alúmina y varios óxidos y álcalis; además es de naturaleza puzolánica y puede reaccionar con cal hidratada para producir elementos cementantes (BRAJA, 2012 pág. 766)	La ceniza de carbón vegetal se dosifica en las proporciones de 20%; 25% y 30% respecto al peso de las muestras de suelo necesario para cada ensayo de caracterización del suelo.	Adición de ceniza de carbón vegetal	Cantidad de ceniza de carbón vegetal	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Balanza digital con precisión de 0.01 g
				Tamaño máximo nominal de la ceniza de carbón vegetal	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Tamiz N° 200(ASTM D 422)
Variable dependiente: Estabilización de suelos	La estabilización de suelos consiste en dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición de otro suelo, a la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea el mecanismo de estabilización, es seguido de un proceso de compactación (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014 pág. 113).	La estabilización de suelos se determina con el efecto de la adición de ceniza de carbón en el análisis granulométrico, humedad natural, índice de plasticidad, máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad, así como en la capacidad de soporte del suelo; siguiendo las normativas ASTM, AASHTO, NTP y MTC para el desarrollo de casa ensayo en laboratorio.	Clasificación de suelo	Análisis granulométrico	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Granulometría por Tamizado (MTC E 107- 2016)
			Humedad natural	Contenido de humedad	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Contenido de humedad (MTC E 108- 2016)
			Índice de plasticidad	Límite líquido, Límite plástico	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Límite de Atterberg (MTC E 110 – 2000/ MTC E 111- 2016)
			Máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad	Proctor modificado	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Proctor Modificado (MTC E 115 – 2016)
			Capacidad de soporte del suelo	California Bearing Ratio	Razón	Manual de Ensayo de materiales MTC 2016	Ficha de Proctor Modificado (MTC E 132 – 2016)

Anexo 3: Panel fotográfico

1. Recojo de material – camino vecinal Mishiyacu – La Piedra



Fotografía 1: Excavación de la calicata 1, camino vecinal Mishiyacu – La Piedra



Fotografía 2: Excavación de la calicata 2, camino vecinal Mishiyacu – La Piedra



Fotografía 3: Excavación de la calicata 3, camino vecinal Mishiyacu – La Piedra

2. Ensayos en laboratorio



Fotografía 4: Análisis granulométrico del suelo. (MTC E 107 – ASTM C 136 – AASHTO T 88)



Fotografía 5: Contenido de humedad. (MTC E 108 – ASTM D 2216)



Fotografía 6: Límites de Atterberg. (MTC E 110; 111 – ASTM D 4318 – AASHTO T 90)

Anexo 4: Ensayos de laboratorio