

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



TESIS

“Análisis comparativo de la influencia en las propiedades índice y mecánicas de un suelo para subrasante añadiendo ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui – Aymaraes – Apurímac, 2021”

Presentado por:

Br. RAYZA MILLUSKA CANO QUISPE

Br. TALIA CARDENAS CASTRO

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

**Abancay – Apurímac – Perú
2024**

Tesis

“Análisis comparativo de la influencia en las propiedades índice y mecánicas de un suelo para subrasante añadiendo ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui – Aymaraes – Apurímac, 2021”

Línea de investigación

Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible.

Asesor

Mtr. Marco Antonio Gálvez Quintana



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

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES
ÍNDICE Y MECÁNICAS DE UN SUELO PARA SUBRASANTE, AÑADIENDO
CENIZA DEL BAGAZO DE LA CAÑADUZ EN LA RUTA CANUA A LLINQUI –
AYMARAES – APURÍMAC, 2021”**

Presentado por la Br. **RAYZA MILLUSKA CANO QUISPE** y Br. **TALIA
CARDENAS CASTRO**, para optar el título profesional de: **INGENIERO CIVIL.**

Sustentado y aprobado el 31 de enero de 2024 ante el jurado:

Presidente : M.Sc. Ángel Maldonado Mendívil.
Primer miembro : Ing. Holguer Cayo Baca.
Segundo miembro : Ing. Rubén Gamarra Mota.
Asesor : Mtr. Marco Antonio Gálvez Quintana.

Análisis comparativo de la influencia en las propiedades índice y mecánicas de un suelo para subrasante añadiendo ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui-Aymaraes - Apurímac, 20

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%

INDICE DE SIMILITUD

23%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

12%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
5	Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes Trabajo del estudiante	1%
6	doku.pub Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	1%

www.repositorio.upla.edu.pe

DEDICATORIA

A el todo celestial; a mi querida madre, padre y hermano que son el mejor regalo divino que he podido recibir, su amor, enseñanzas, consejos, fortalezas me hacen admirarlos cada día más, estaré infinitamente agradecida por el apoyo que me han brindado desde siempre, por tener corazones tan nobles, los quiero muchísimo y muchas gracias por todo. A mi hermano le retribuyo el haberme impulsado a cumplir la meta de la titulación y a la vez por mostrarme el mundo con otros ojos. No me olvido de ti querido, quien estuvo a mi lado en todo este proceso ayudándome y motivándome. Y a mi fiel amiga, gracias por tu tiempo y las alegrías, tu partir fue difícil, te recordaré.

De: Rayza

A mi luz de vida, mi querido Valentino, eres el mayor regalo que la vida me pudo brindar. A mi querido padre, mi ángel de la guarda, espero estes orgulloso de mí. A mi madre, por absolutamente todas las enseñanzas que me brindaste. A mis hermanos y sobrina. A mi compañero, me enseñaste a ver lo positivo de la vida.

De: Talia

AGRADECIMIENTOS

El primer agradecimiento siempre a Jehová, por todos los regalos en la vida, porque con él todo se puede.

A cada uno de los docentes que nos impartieron sus enseñanzas y experiencias académicas.

A nuestro asesor por brindarnos su apoyo y comprensión; también por guiarnos en cada paso hasta el logro de nuestros objetivos personales.

A los jurados de este trabajo de tesis por su interés, crítica y apoyo durante el proceso de esta tesis.

Al ingeniero César Arbulú Jurado por realizar contenido sobre la metodología de investigación para la rama de la ingeniería civil.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA.....	i
POSPORTADA	ii
PÁGINA DE JURADOS.....	iii
REPORTE DE SIMILITUD	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xiv
ACRÓNIMOS	xv
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	xix
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Planteamiento del problema de la investigación	1
1.1.1. <i>Realidad problemática</i>	1
1.2. Identificación y formulación del problema.....	3
1.2.1. <i>Problema general</i>	3
1.2.2. <i>Problemas específicos</i>	3
1.3. Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	4
1.4. Justificación.....	4
1.5. Delimitación de la investigación	5

1.5.1. <i>Delimitación espacial</i>	5
1.5.2. <i>Delimitación temporal</i>	6
1.5.3. <i>Conceptual</i>	6
1.6. Viabilidad de la investigación	6
1.7. Limitaciones de la Investigación.....	7
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Antecedentes de investigación.....	8
2.1.1. <i>A nivel internacional</i>	8
2.1.2. <i>A nivel nacional</i>	11
2.1.3. <i>A nivel regional y local</i>	14
2.2. Bases teóricas.....	16
2.2.1. <i>Ceniza del bagazo de la cañaduz</i>	16
2.2.2. <i>Suelo</i>	17
2.2.3. <i>Propiedades índices de los suelos</i>	17
2.2.4. <i>Propiedades mecánicas de los suelos</i>	36
2.2.5. <i>Consideraciones del suelo como subrasante</i>	45
2.3. Marco conceptual	46
CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	51
3.1. Hipótesis.....	51
3.1.1. <i>Hipótesis general</i>	51
3.1.2. <i>Hipótesis específicas</i>	51
3.2. Método de investigación.....	52
3.3. Enfoque de la investigación.....	52
3.4. Tipo de investigación.....	52
3.5. Nivel o alcance de investigación	52

3.6. Diseño de investigación.....	53
3.7. Operacionalización de variables.....	54
3.8. Población, muestra y muestreo	56
3.8.1. Población.....	56
3.8.2. Muestra	56
3.8.3. Muestreo	57
3.9. Técnicas e instrumentos.....	57
3.9.1. Técnicas.....	57
3.9.2. Instrumentos.....	58
3.10. Procesamiento estadístico	58
 CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	 61
4.1. Resultados	61
4.1.1. Ensayos a la ceniza del bagazo de la cañaduz.....	61
4.1.2. Propiedades índice y mecánicas del suelo grupo control.....	62
4.1.3. Límite líquido del grupo control y muestral	64
4.1.4. Límite plástico del grupo control y muestral	65
4.1.5. Índice de plasticidad del grupo control y muestral	65
4.1.6. Máxima densidad seca del grupo control y muestral.....	66
4.1.7. CBR de suelos (laboratorio) del grupo control y muestral	67
4.2. Discusión de resultados	68
4.2.1. Objetivo específico 1	68
4.2.2. Objetivo específico 2	69
4.2.3. Objetivo específico 3	70
4.3. Prueba de hipótesis.....	70
4.3.1. Prueba de hipótesis específica 1.....	70

4.3.2. Prueba de hipótesis específica 2	74
4.3.3. Prueba de hipótesis específica 3.....	78
4.3.4. Prueba de hipótesis general.....	81
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Coordenadas UTM de las progresivas 6+000 y 8+000.</i>	5
Tabla 2. <i>Coordenadas geográficas de las progresivas 6+000 y 8+000.</i>	5
Tabla 3. <i>Composición química de las puzolanas naturales.</i>	17
Tabla 4. <i>Serie de tamices en mm y pulgadas.</i>	19
Tabla 5. <i>Serie de tamices para un espaciamiento de puntos uniforme.</i>	19
Tabla 6. <i>Tabla referencial sobre la cantidad de muestra para análisis por tamizado fracción retenida en el tamiz N° 10 (2.00 mm).</i>	20
Tabla 7. <i>Estimados de precisión.</i>	29
Tabla 8. <i>Tiempo mínimo de duración sumergido de los suelos según su clase.</i> .	39
Tabla 9. <i>Penetraciones en milímetros y pulgadas.</i>	44
Tabla 10. <i>Condiciones de la subrasante según el CBR.</i>	45
Tabla 11. <i>Proceso para la medición de variables.</i>	54
Tabla 12. <i>Resultado de las progresivas y distancia para la extracción de especímenes.</i>	57
Tabla 13. <i>Análisis de la varianza de medidas totalmente repetidas.</i>	58
Tabla 14. <i>Análisis granulométrico por tamizado de la ceniza del bagazo de la cañaduz.</i>	61
Tabla 15. <i>Análisis químico de la ceniza del bagazo de la cañaduz.</i>	62
Tabla 16. <i>Resultados de la gradación de los suelos por tamizado del grupo control.</i>	62
Tabla 17. <i>Resultados de la clasificación de los suelos del grupo control.</i>	63
Tabla 18. <i>Resultados del límite de consistencia, MDS y CBR del grupo control.</i>	63
Tabla 19. <i>Resultados del ensayo para determinar el L. L. de los suelos.</i>	64
Tabla 20. <i>Resultados del ensayo para determinar el L. P. de los suelos.</i>	65

Tabla 21. <i>Resultados del I. P. de los suelos.</i>	65
Tabla 22. <i>Resultados de la MDS de los suelos en g/cm³.</i>	66
Tabla 23. <i>Resultados del valor CBR de suelos al 95% de la MDS, correspondiente a 0.1”</i>	67
Tabla 24. <i>Resultados del análisis de normalidad con Shapiro – Wilk del I. P.</i>	71
Tabla 25. <i>Resultados del análisis de homocedasticidad con Levene del I. P.</i>	71
Tabla 26. <i>Resultados del análisis de esfericidad del I. P.</i>	72
Tabla 27. <i>Media y desviaciones estándar (DE) del I. P.</i>	72
Tabla 28. <i>ANOVA MR del I. P.</i>	73
Tabla 29. <i>Resultados del análisis de Bonferroni del I. P.</i>	73
Tabla 30. <i>Resultados del análisis de normalidad con Shapiro – Wilk de la MDS.</i>	74
Tabla 31. <i>Resultados del análisis de homocedasticidad con Levene de la MDS.</i>	75
Tabla 32. <i>Resultados del análisis de esfericidad de la MDS.</i>	75
Tabla 33. <i>Media y desviaciones estándar (DE) de la MDS.</i>	76
Tabla 34. <i>ANOVA MR de la MDS.</i>	76
Tabla 35. <i>Resultados del análisis de Bonferroni de la MDS.</i>	77
Tabla 36. <i>Resultados del análisis de normalidad con Shapiro – Wilk del CBR.</i>	78
Tabla 37. <i>Resultados del análisis de homocedasticidad con Levene del CBR.</i>	78
Tabla 38. <i>Resultados del análisis de esfericidad del CBR.</i>	79
Tabla 39. <i>Media y desviaciones estándar (DE) del CBR.</i>	79
Tabla 40. <i>ANOVA MR del CBR.</i>	80
Tabla 41. <i>Resultados del análisis de Bonferroni del CBR.</i>	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Estados de consistencia y límites de Atterberg.</i>	23
Figura 2. <i>Cierre de la abertura, longitud mínima de 13 mm.</i>	27
Figura 3. <i>Visualización de la zona extraída.</i>	27
Figura 4. <i>Gráfica de la carta de plasticidad.</i>	36
Figura 5. <i>Resultados del ensayo para determinar el L. L. de los suelos.</i>	64
Figura 6. <i>Resultados del ensayo para determinar el L. P. de los suelos.</i>	65
Figura 7. <i>Resultados del I. P. de los suelos.</i>	66
Figura 8. <i>Resultados de la MDS de los suelos en g/cm³.</i>	67
Figura 9. <i>Resultados del CBR de suelos al 95% de la MDS, correspondiente a 0.1”</i>	68

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. <i>Expresión para obtener el I. P.</i>	30
Ecuación 2. <i>Índice de grupo</i>	32
Ecuación 3. <i>Coeficiente de uniformidad y curvatura.</i>	34
Ecuación 4. <i>Sumatoria de cuadrados, entre sujetos.</i>	59
Ecuación 5. <i>Sumatoria de cuadrados, dentro de sujetos.</i>	59
Ecuación 6. <i>Suma de cuadrados tiempo</i>	59
Ecuación 7. <i>Suma de cuadrados del error.</i>	59

ACRÓNIMOS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes).

Al₂O₃ : Trióxido de dialuminio, óxido de aluminio, óxido aluminico o aluminia.

ANOVA MR: Análisis de la varianza de medidas repetidas

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales).

CB: Ceniza de bagacillo.

CBC: Ceniza del bagazo de la cañaduz.

CBCA o SCBA: Ceniza de bagazo de caña de azúcar.

CBR: California Bearing Ratio, en español Relación de Soporte de California.

Cc: Coeficiente de curvatura.

CCA o RHA: Ceniza de cáscara de arroz.

COH: Contenido óptimo de humedad.

CPC: Cemento portland compuesto.

Cu: Coeficiente de uniformidad.

D10: Diámetro de la abertura correspondiente al 10% del porcentaje que pasa del suelo.

D30: Diámetro de la abertura correspondiente al 30% del porcentaje que pasa del suelo.

D60: Diámetro de la abertura correspondiente al 60% del porcentaje que pasa del suelo.

DOE o DoE: Diseño de experimentos.

EG-2013: Especificaciones técnicas generales para construcción.

Fe₂O₃: Trióxido de dihierro, óxido de hierro u oxido férrico.

FRX: Fluorescencia de rayos X.

INACAL: Instituto Nacional de Calidad.

IP o I. P.: Índice de plasticidad.

LA: Arcilla laterítica.

LL o L. L.: Límite líquido.

LP o L. P.: Límite plástico.

MDS: Máxima densidad seca.

MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

NP: No plástico.

NTP: Norma Técnica Peruana.

RAE: Real Academia Española.

SiO₂: Dióxido de silicio, oxido de silicio, anhídrido silícico o sílice.

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

USCS: Unified Soil Classification System.

UPN: Universidad Privada del Norte.

UTM: Universal Transversal de Mercator.

WGS84: World Geodetic System 84.

RESUMEN

En el transcurso de los años se han desarrollado estudios para la mejora de las propiedades índice y mecánicas de los suelos empleando cenizas de residuos como es el bagazo de la cañaduz, y continuando con esa línea de investigación esta tesis se planteó el objetivo de determinar la influencia en las propiedades índice y mecánicas de un suelo para subrasante añadiendo ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui. Para lograr ello, se empleó el método hipotético deductivo con enfoque cuantitativo, el nivel de estudio alcanzado fue explicativo de diseño experimental, el muestreo fue probabilístico aleatorio y para la obtención de datos se utilizó la observación estructurada con apoyo de guías de observación. Se realizaron ensayos físicos – químicos a la ceniza y ensayos físico – mecánicos a las muestras de suelo antes y después de incorporar la ceniza del bagazo de la cañaduz. Los resultados indicaron reducciones significativas en el índice de plasticidad cuando se agrega 5% de ceniza del bagazo de la cañaduz, y los valores de la densidad seca máxima disminuyen cada vez que el porcentaje de ceniza aumenta; en la relación de soporte de california se presentaron incrementos con los tres porcentajes de adición respecto a los suelos sin adición, con un incremento máximo promedio de 522.96% cuando añadimos 10% de ceniza del bagazo de la cañaduz. Por lo tanto, se ha concluido que la ceniza del bagazo de la cañaduz influye significativamente en las propiedades índice y mecánicas de los suelos.

Palabras clave: Propiedades índice, propiedades mecánicas, ceniza, bagazo, cañaduz.

ABSTRACT

Over the years, studies have been carried out to improve the index and mechanical properties of soils using waste ashes such as sugarfish from the ravine, and continuing with this line of research, this thesis set itself the objective of determining the influence on the index and mechanical properties of a subgrade soil by adding ash from the sugarcane bagasse on the Canua to Llinqui route. To achieve this, the hypothetical deductive method with a quantitative approach was used, the level of study achieved was explanatory of experimental design, the sampling was random probabilistic and structured observation was used to obtain data with the support of observation guides. Physical-chemical tests were carried out on the ash and physical-mechanical tests were carried out on the soil samples before and after incorporating the ash from the bagasse of the ravine. The results indicated significant reductions in the plasticity index when 5% ash is added from the cañaduz bagasse, and the values of the maximum dry density decrease each time the percentage of ash increases; In the California support ratio, there were increases with the three percentages of addition with respect to soils without addition, with an average maximum increase of 522.96% when we added 10% of ash from the sugareland bagasse. Therefore, it has been concluded that the ash of sugarcane bagasse significantly influences the index and mechanical properties of soils.

Keywords: Index properties, mechanical properties, ash, bagasse, bagasse, reed cane.

INTRODUCCIÓN

Existen diversos factores que coadyuvan a que una carretera no brinde un adecuado servicio, siendo uno de ellos el comportamiento desfavorable del suelo (Vidaud-Quintana et al., 2019) en la subrasante.

Es por ello que, en el Perú, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) estableció que aquellos suelos que estén por debajo de la superficie denominada subrasante “deberán ser suelos adecuados y estables” (p. 24) y la relación de soporte de California igual o mayor a 6% o 40%, el primero valor es a nivel de corte y el segundo a nivel de relleno, en caso de no cumplir, se debe considerar la “estabilización, mejora o refuerzo de los suelos” (p. 22) (Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC], 2014) con agentes estabilizadores inorgánicos u orgánicos.

En vista de que algunos suelos no cumplen con las exigencias que dicta la norma, se han ido efectuando estudios experimentales empleando la pavesa del bagazo de la cañaduz con la finalidad estabilizar los suelos. En todos los estudios referidos en esta investigación, se observa incrementos en la relación de soporte de california después de aplicar el tratamiento, asimismo la máxima densidad seca registra incrementos a excepción del estudio realizado por Ojeda-Farías et al. (2018) y el índice de plasticidad también presenta variaciones luego de añadir ceniza del bagazo de la cañaduz (CBC).

Entonces, el fondo de realizar el estudio fue implementar el uso de ceniza del bagazo de la cañaduz para la mejora de las propiedades índice y mecánicas de los suelos en la ruta Canua – Llinqui entre la progresiva 6+000 a 8+000 y prescindir del transporte de material de calidad desde una cantera o el uso de otros agentes estabilizadores.

Para ello, se debía determinar la influencia en las propiedades índice y mecánicas de un suelo para subrasante, añadiendo ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta y tramo mencionado en el párrafo anterior.

La cantidad de ceniza del bagazo de la cañaduz añadida fueron en proporciones de 5%, 10% y 15% en relación a la masa del suelo seco, y se realizaron las pruebas de laboratorio para conocer el índice de plasticidad, la máxima densidad seca y la relación de soporte de california antes y después de aplicar el tratamiento.

La estructura del presente documento contiene cuatro capítulos.

Capítulo I. Veremos el planteamiento del problema, identificación y formulación del problema, objetivos, justificación, delimitación, viabilidad y limitaciones de la investigación.

Capítulo II. Está orientado a los antecedentes de investigación, bases teóricas de las variables, y un marco conceptual.

Capítulo III. Este apartado contiene las hipótesis de la investigación; el método, enfoque, tipo, nivel, diseño de la investigación; así como el cuadro de operacionalización de variables; la población, muestra y muestreo; técnicas e instrumentos empleados y finalmente el procesamiento estadístico para la validación de las hipótesis.

Capítulo IV. Los resultados de los experimentos se presentan en esta sección, luego se tiene la discusión de resultados y finalmente la prueba de hipótesis.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema de la investigación

1.1.1. *Realidad problemática*

Diversos estudios geotécnicos realizados a los agregados no conglomerados que se encuentran por debajo de la superficie conocida como subrasante, demuestran que las propiedades índice y mecánicas no siempre cumplen con los parámetros establecidos para el diseño de un pavimento, entonces tenemos “suelos insuficientes o inadecuados” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2014, p.22).

El problema de suelos inadecuados en la subrasante se presenta a nivel mundial. En el caso de Colombia, se estudió una muestra de suelo y resultó que la relación de soporte de california (CBR) al 95% de la máxima densidad seca (MDS) fue de 2.2% antes de la inmersión y 1.9% después de la inmersión; su índice de plasticidad (I. P.) fue de 12%; y su clasificación conforme a la AASHTO indica que pertenece al grupo A-2-6, esto precisa ser un suelo insuficiente para subrasante, por ello, se planteó el mejoramiento del suelo con un aditivo orgánico (Lozano et al., 2015). Asimismo, otro estudio realizado a una muestra de suelo en el municipio

Agua de dios, resultó ser un suelo inadecuado, puesto que, su CBR al 95% de la MDS fue de 1%; su I. P. fue de 24%; y según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) es un suelo areno arcilloso de baja plasticidad (CL), en ese sentido, el investigador debía mejorar las propiedades de los suelos debajo de la subrasante, por lo tanto, se propuso agregar ceniza de cascarilla de arroz para analizar su comportamiento físico y mecánico del suelo (Barragán y Cuervo, 2019).

Del mismo modo, en Ecuador, se llevó a cabo una investigación para estabilizar con cal un suelo arcilloso en la ciudad de Macas, la muestra analizada dio un valor de 4.1% de CBR al 95% de la MDS; un IP de 52.22%; y según el SUCS es de clase arcilla orgánica de alta comprensibilidad (OH), perteneciente al grupo A-7-5 según el sistema AASHTO (Castillo Parra, 2017).

A nivel nacional también se enfrenta el mismo problema, tal es el caso en Trujillo, donde los suelos estudiados dieron un valor de CBR al 95% de la MDS de 1.888%, 1.843% y 1.739%; un IP de 9.54%, 14.19% y 13.25%; y de acuerdo a la sistema USCS las tres muestras de suelo se clasifican como arcillas de plasticidad baja (CL) y de acuerdo al sistema AASHTO el primero cumple con condiciones al grupo A-4 y los otros dos al grupo A-6; finalmente los resultados de CBR de estos suelos no satisfacen los requisitos para ser empleados como subrasante (Terrones, 2019).

En Lima, se realizó ensayos a una muestra de suelo en la avenida Universitaria y de ello resultó que su CBR a un 95% de la MDS fue de 1.9%; con un IP de 12% y corresponde al grupo A-6 (Ccanto, 2019).

En Cajamarca, se ensayó a una porción de suelo dando como valor de CBR a un 95% de la MDS de 3.92%, un I. P. de 11%, y clasifica como suelo arcilloso de plasticidad baja (CL) conforme a el USCS y por sus resultados estaría incluido en

el grupo A-6, con todo ello, se pudo indicar que es un suelo inadecuado para subrasante (Galvez y Santoyo, 2019).

En Abancay, los suelos de la vía de evitamiento resultaron en 7.37% y 4.91% de CBR al 95% de MDS; un IP de 12% y 29%; y de acuerdo a la clasificación SUCS son arcillas finas arenosas (CL); la primera muestra corresponde al grupo A-6 y la segunda al grupo A-7-5 (Carbajal, 2022). De igual manera, en el camino vecinal San Gabriel, la muestra analizada alcanzó un CBR al 95% de la MDS de 5.3% y se obtuvo un IP de 16.94% (Salas, 2022).

De acuerdo a lo presentado, podemos indicar que la necesidad de mejorar las propiedades índice y mecánicas de los suelos para subrasante, se da porque estos no satisfacen las características mínimas establecidas en el manual de carreteras, suelos geología, geotecnia y pavimentos; esto conlleva a desarrollar estudios para contar con aditivos estabilizadores orgánicos e inorgánicos que nos ayuden a mejorar o estabilizar los suelos. Por ello, se realiza esta investigación para determinar si la ceniza del bagazo de la cañaduz (CBC) modifica las propiedades índice y mecánicas de los suelos que se encuentran por debajo de la línea de subrasante y pueda ser empleado como aditivo estabilizador.

1.2. Identificación y formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo influye en las propiedades índice y mecánicas de un suelo de subrasante, la adición de ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui, 2021?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cómo influye en el índice de plasticidad de un suelo de subrasante, la adición de la ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui?

2. ¿Cómo influye en la máxima densidad seca de un suelo de subrasante, la adición de la ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui?

3. ¿Cómo influye en la relación de soporte de california de un suelo de subrasante, la adición de la ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Determinar la influencia en las propiedades índice y mecánicas de un suelo de subrasante, al añadir ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui, 2021.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Determinar la influencia en el índice de plasticidad de un suelo de subrasante, al añadir ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui.

2. Determinar la influencia en la máxima densidad seca de un suelo de subrasante, al añadir ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui.

3. Determinar la influencia en la relación de soporte de california de un suelo de subrasante, al añadir ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui.

1.4. Justificación

El estudio se justifica en el uso de la ceniza del bagazo de la cañaduz como estabilizante del suelo comprendido entre la progresiva 6+000 a 8+000 del camino vecinal Canua – Llinqui, a fin de no tener que transportar material seleccionado desde una cantera.

La razón de elegir la ruta Canua a Llinqui, fue porque los suelos contienen arcilla, un tipo de roca que generalmente presenta relaciones de soporte california pobres e índices de plasticidad muy elevados.

Se realizó una inspección visual a la ruta mencionada y se identificó que entre la progresiva 6+000 a 8+000 la subrasante presenta áreas hundidas, fango y los vehículos pasan con dificultad esta zona, por estas razones se elige este tramo como población de estudio.

Se observó en estudios anteriores que los aumentos significativos en el valor de CBR fueron al incorporar 3%, 5%, 8% y 15% de ceniza del bagazo de la cañaduz, entonces se elige el rango entre 5% y 15% con un valor intermedio de 10% para esta investigación.

1.5. Delimitación de la investigación

1.5.1. Delimitación espacial

El presente estudio se desarrolló entre la progresiva 6+000 y 8+000 de la ruta Canua a Llinqui, perteneciente al distrito de Toraya; provincia de Aymaraes; departamento de Apurímac.

Tabla 1.

Coordenadas UTM de las progresivas 6+000 y 8+000.

Progresiva	Coordenadas UTM: WGS 84		
	Norte (m)	Este (m)	Altitud (m. s. n. m.)
6+000	8448550	683744	3362
8+000	8448685	684230	3486

Nota. Datos tomados con receptor GPS.

Tabla 2.

Coordenadas geográficas de las progresivas 6+000 y 8+000.

Progresiva	Coordenadas geográficas	
	Latitud	Longitud
6+000	14° 1' 39.54" S	73° 17' 54.78" O
8+000	14° 1' 35.39" S	73° 17' 38.39" O

Nota. (Airbus, 2021).

1.5.2. Delimitación temporal

En marzo de 2021 se realizó la observación de la ruta Canua a Llinqui, en agosto de 2021 se ubicaron y extrajeron las muestras seleccionadas al azar y se realizaron los ensayos necesarios para determinar la clasificación del suelo, índice de plasticidad, densidad seca máxima y su relación de soporte de California, previo y posterior a la adición de ceniza del bagazo de la cañaduz en 5%, 10% y 15% en relación a la masa de suelo seco.

1.5.3. Conceptual

El empleo de un aditivo químico como es la ceniza del bagazo de la cañaduz implica que estamos dentro de la categoría estabilización química, como indica Das (2015) este proceso “se usa para reducir la plasticidad del suelo y el potencial de expansión-contracción” (p. 266).

Según Das (2015) el conjunto de operaciones que cambian “las propiedades de ingeniería” (p. 266) del suelo se conoce como estabilización o también se puede señalar como mejoramiento.

1.6. Viabilidad de la investigación

Para señalar que la investigación es viable, es necesario conocer si se tendrá los recursos tales como la muestra, laboratorios y economía; por ello, se ha verificado primero la accesibilidad a la zona de estudio (población); segundo, poder obtener las muestras de suelo y ceniza del bagazo de la cañaduz; tercero, tener acceso al laboratorio de mecánica de suelos de la universidad u otro laboratorio que posea equipos calibrados; cuarto, que se pueda contar con los servicios de un laboratorio químico para la obtención del porcentaje de los elementos SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 ; y por último contar con la economía para poder solventar los gastos de transporte, servicios, administrativos y de gabinete.

Asimismo, para la viabilidad de la investigación, se debe tener en cuenta el tiempo, en ese sentido, si para conocer los resultados se tendrá que esperar muchos años, el estudio puede ser declarado como no viable.

Analizado todos los aspectos mencionados, se pudo decir que la investigación es viable; es preciso mencionar que en el punto tres se tuvo dificultad puesto que la universidad limitó el acceso al laboratorio de suelo por motivos de sanidad debido a la pandemia originada por el virus SARS-CoV-2; pero se pudo encontrar un laboratorio que realiza estudios geotécnicos y además brindaba el acceso cumpliendo con todas las medidas de salubridad.

1.7. Limitaciones de la Investigación

No se pudo acceder al laboratorio químico.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

Para un análisis más profundo de la investigación, ha sido necesario verificar estudios previos para poder contrastar y encontrar similitudes o diferencias en los resultados; y este apartado recopila estudios en los tres niveles: internacional, nacional y local.

2.1.1. A nivel internacional

Portilla y Andaluz (2022), en su investigación tuvieron el objetivo de “analizar el efecto de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades físico – mecánicas en los suelos físico de subrasante”. Realizaron una investigación experimental de nivel explicativo, donde a las muestras extraídas se les agregó 1%, 3%, 5%, 8% de pavesa proveniente de la cáscara de arroz (CCA), y se realizaron las pruebas de consistencia, proctor modificado y CBR. El I. P. de las muestras extraídas fueron 7.31%, 24.37% y 27.25%, la MDS fue de 1.241 g/cm³, 1.261 g/cm³ y 1.236 g/cm³ y el valor de CBR al 95% de la MDS fue de 7.80%, 8.60% y 8.40%. Luego de añadir los porcentajes de CCA los resultados en la MDS disminuyeron hasta 1.178 g/cm³, 1.164 g/cm³ y 1.137 g/cm³ al añadirle 8% de CCA. El valor de CBR a un 95% de

la MDS presentó un aumento, alcanzando valores de 12.10%, 13.20% y 13.50% para una adición de 8% de CCA. Se concluye que la ceniza de cáscara de arroz produce efectos positivos en las propiedades físico - mecánicas en el suelo limoso de baja plasticidad (ML) y arcilloso de baja plasticidad (CL).

De Lima et al. (2022), realizaron la investigación con el objetivo de “estudiar la estabilización de un suelo arenoso laterítico (LA) con poca arcilla laterítica, utilizando cenizas de la quema de bagazo de caña de azúcar” y cal hidratada. Realizaron tres mezclas: primero, suelo y 5% de ceniza; segundo, suelo con 5% de ceniza y 1% de cal hidratada; tercero, suelo con 5% de ceniza y 2% de cal hidratada. La mezcla con resultados acordes al objetivo es la de suelo con 5% de ceniza y 2% de cal hidratada, aumentando el valor de CBR de 40% a 83%, así como la MDS de 1.68 g/cm³ a 1.72 g/cm³ y su contenido de humedad disminuyó de 23% a 20%.

Los investigadores Athira y Sini (2019) tuvieron como objetivo “determinar el efecto de la ceniza de bagazo sobre las características de resistencia y propiedades índice de la arcilla de caolinita”. El diseño de la investigación es experimental puro, donde agregaron porcentajes de ceniza producto del bagazo de la caña de azúcar a una arcilla de caolinita en 1.5%, 3%, 4.5% y 6% y se realizaron pruebas de proctor estándar, relación de carga de california y límites de Atterberg. El resultado de las propiedades químicas de la CB fue un 70.87% de SiO₂, 6.86% de Al₂O₃, 4.87% de Fe₂O₃. El resultado en la prueba estándar determinó que existe una proporción inversa entre la cantidad de CBCA y el resultado de la MDS. El valor CBR de la arcilla caolinita sin adición de CBCA fue de 3.80%, y al añadirle 1.5% de CBCA aumentó a 4.20%, luego alcanzó un 5.85% al añadirle 3% de CBCA, después disminuyó a 4.58% para un 4.5% de CBCA y para un 6% de CBCA registró un

4.11%. En la prueba de límites de Atterberg, se presenta una disminución del L. L. y un aumento en el L. P. a medida que la cantidad de CBCA aumenta, y al igual que el límite líquido el índice de plasticidad también disminuye cuando el porcentaje de CBCA aumenta. En conclusión, la máxima densidad seca disminuye con el aumento de CBCA, el aumento óptimo del valor de CBR fue de 3.80% a 5.85% para un 3% de CBCA y el índice de plasticidad disminuye de 47% a 10%.

Para Ojeda-Farías et al. (2018), su objetivo del trabajo fue “estudiar la influencia de la ceniza del bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del cemento portland compuesto (CPC) para mejorar las propiedades de un suelo granular arenoso”. El diseño del estudio es experimental puro, la CBCA fue obtenida de la combustión del bagazo de caña de azúcar a una temperatura alrededor de los 700°C, la muestra se obtuvo de un banco de materiales del Castillo, México. Mediante el análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) se determinó la composición química en óxidos de la CBCA, resultando un 62.66% de SiO₂, 5.20% Al₂O₃ y 5.19% de Fe₂O₃, y los resultados de las características geotécnicas del suelo granular arenosos en estudio fueron: 31.2% de límite líquido, no presenta L. P. he I. P., la MDS fue de 1311 kg/m³ y un valor de CBR de 24.5%; al realizar la combinación de suelo y CBCA en porcentajes de 3%, 5% y 7% se obtiene una MDS de 1328 kg/cm³, 1316 kg/cm³ y 1303 kg/cm³ el valor de CBR fue de 34%, 49% y 47% respectivamente. De acuerdo a los resultados obtenidos se resuelve que la CBCA genera cambios favorables en las propiedades del suelo granular arenoso.

Niken Silmi Surjandari et al. (2017), realizaron un estudio con el objetivo de “evaluar la mejora de las propiedades de ingeniería del suelo expansivo utilizando ceniza de bagazo”. La investigación es del tipo experimental, el grupo control

corresponde al suelo expansivo sin tratamiento y el grupo experimental pertenece a los suelos tratados con ceniza de bagazo. El contenido de la ceniza se ha definido en valores porcentuales en relación al peso del suelo seco. Los porcentajes seleccionados fueron 5%, 10%, 15% y 20%; siendo óptimo el 15%, puesto que, el porcentaje de hinchamiento se redujo de 5.48% a 3.08%, el resultado del resto de pruebas para la dosis óptima fueron las siguientes: el L. L. no tuvo una variación significativa, el L. P. se incrementó, haciendo que el I. P. redujera, su MDS se elevó y el contenido de humedad se redujo.

2.1.2. A nivel nacional

En una investigación realizada por Castillo (2022), se tuvo que “determinar en qué medida existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos mediante el uso de la ceniza del bagazo de caña de azúcar para mejorar la estabilización de base del pavimento”. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo de nivel aplicativo, se empleó el método deductivo y el diseño experimental. La dosificación de la ceniza de bagazo de caña de azúcar fue en relación al peso del suelo seco, en porcentajes de 1%, 2% y 3%. Los resultados de las pruebas realizadas fueron los siguientes: al determinar la MDS mediante Proctor modificado – método C, se verifica un incremento en la relación peso – volumen cuando se va incorporando más ceniza, el resultado inicial en promedio fue de 1.78 g/cm³ y al añadir el 1%, 2% y 3% se alcanzó un 1.98 g/cm³, 2.01 g/cm³ y 2.08 g/cm³, respectivamente; el mismo comportamiento presenta el óptimo contenido de humedad, resultando un 5.52%, 6.44%, 7.11%, 7.45% para una dosificación del 0%, 1%, 2% y 3%, respectivamente; igualmente el valor de CBR al 95% de la MDS desarrolla una mejora con la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar, el valor promedio de las muestras sin el tratamiento resultó en 76.66%, y los

resultados con el tratamiento fueron de 77.31%, 92.10% y 102.35%, para una dosis de 1%, 2% y 3%, respectivamente.

Hidalgo et al. (2020), tuvo el objetivo de “estudiar la estabilización de suelo arcilloso para subrasante utilizando ceniza de cascarilla de arroz (RHA) y ceniza del bagazo de caña de azúcar (SCBA)”. La muestra de suelo clasificó como suelo arcilloso con plasticidad baja que corresponde al símbolo CL; los resultados de la mezcla S90 + A5 + B5 indican que el I. P. disminuye, la MDS y el CBR aumentan; las mezclas S85 + A7.5 + B.75 y S80 + A10 + B10 generan disminución en el I. P., así como en la MDS y en el CBR. La mezcla S90 + A5 + B5 alcanza un CBR de 33.75% y una MDS de 1.849 g/cm³.

Ccanto (2019), en su investigación tuvo como objetivo “determinar la influencia de la adición de ceniza de Bagacillo CB en porcentajes de 10%, 15 % y 20 %, en el mejoramiento de la estabilidad del suelo arcilloso para su uso como subrasante”. El estudio tuvo un enfoque cuantitativo, el tipo de muestreo fue la selección aleatoria y por ende empleo el diseño denominado experimental, a su vez menciona que los instrumentos aplicados se basaron en las normas ASTM de designaciones D 422, D 4318, D 1557 y D 1883. El resultado obtenido con respecto a la clasificación del suelo fue un CL, su límite líquido dio un 35% y su índice de plasticidad un 12%, la MDS dio 1.838 g/cm³ y su CBR fue de 1.9% sin la incorporación de la CB. Al incorporar la CB en 10%, 15% y 20% la MDS resultó en 1.812 g/cm³, 1.801 g/cm³ y 1.794 g/cm³, el valor de CBR fue de 4.1%, 10.9% y 11.9% respectivamente. Con ello, se concluye que la MDS disminuye cuando el porcentaje de ceniza de bagazo aumenta y el valor de CBR alcanzó su máximo porcentaje para una adición de 20% de ceniza de bagazo.

Aquino (2020), estableció como objetivo “determinar la influencia de la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar en la estabilización de suelos a nivel de subrasante”. La investigación tiene un nivel explicativo, del tipo aplicada, el diseño seleccionado fue el experimental, la muestra fue obtenida por muestreo no probabilístico. Los resultados de las pruebas en las muestras sin tratamiento presentó una MDS de 1.90 g/cm³, 1.89 g/cm³, 1.91 g/cm³; un contenido de humedad óptimo de 11.78%, 11.71%, 11.86% y un valor CBR de 2.93%, 2.84% y 3.14%; los porcentajes respecto al peso de suelo seco establecidos fueron de 5%, 10% y 15% y se obtuvo incrementos en las tres pruebas antes mencionadas; los resultados de la máxima densidad seca luego de añadir ceniza de manera creciente fueron de 1.89 g/cm³ a 1.92 g/cm³, 2.00 g/cm³ y 2.05 g/cm³; del contenido de humedad fue de 11.71% a 12.39%, 13.34% y 13.67%; y los valores CBR a un 95% de la MDS fue de 2.84% a 3.72%, 6.56% y 14.28%. Con respecto al índice de plasticidad fue reduciendo su porcentaje cuando mayor era la presencia de ceniza.

Terrones (2019), tuvo como objetivo “determinar la influencia de la adición de ceniza del bagazo de caña de azúcar en porcentajes de 5%, 10% y 15% en peso de suelo seco en la estabilización de suelos arcillosos”. El diseño que empleó fue la experimental pura, se estudiaron cinco muestras y los porcentajes ceniza de bagazo de caña de azúcar propuestos fueron 5%, 10% y 15%. Los resultados demuestran que la CBCA influye en la MDS y en el COH ocasionando que ambos resultados se incrementen cada vez que aumenta la cantidad de ceniza; con respecto al CBR la adición al 15% de ceniza alcanzó valores significativos, incrementándose de 2.65% a 22.5%, de 3.05% a 22.4% y de 2.98% a 21.9%.

2.1.3. A nivel regional y local

Salas (2022), propuso como objetivo “evaluar la influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar para mejorar la subrasante del camino vecinal”. La investigación es del tipo aplicada, con un diseño cuasi experimental; la incorporación de la ceniza está relacionado al peso cuando el suelo está seco en 5%, 10% y 15%. Los resultados en cuanto al contenido de humedad mostraron reducciones cada vez que la cantidad de ceniza aumenta, los resultados son de 10.40%, 9.50%, 8.50% y 7.90%. Las pruebas para determinar el límite líquido, plástico y cálculo del índice de plasticidad para las dosificaciones de 0%, 5%, 10% y 15% fueron: 39.08%, 35.30%, 33% y 31.50%; 22.14%, 21.60%, 20.90% y 20.50%; 16.94%, 13.80%, 12.10% y 11.10%, respectivamente. Los valores de CBR al 95% de la MDS para la muestra sin adición y muestras con adición al 5%, 10% y 15% resultaron en 5.30%, 13.27%, 19.10% y 21.90%, respectivamente.

Enciso (2022), tiene como objetivo “determinar en qué medida influye la adición de ceniza de eucalipto en la mejora de la estabilidad de la subrasante”. Su enfoque de la investigación según el autor es cuantitativo, de propósito aplicada, con nivel explicativo, el diseño aplicado es experimental, las proporciones aplicadas fueron 3%, 6% y 8%. El contenido de humedad sufre un descenso cuando el porcentaje de ceniza añadido asciende; el L. L., el L. P. y el I. P. también mostraron reducciones graduales cada vez que la cantidad de ceniza agregada al suelo iba ascendiendo. La MDS y el CBR asciende cuando el porcentaje de ceniza aumenta, los resultados obtenidos fueron 1.903 g/cm³, 1.937 g/cm³, 1.976 g/cm³ y 1.988 g/cm³; 5.48%, 7.46%, 8.47% y 9.86% de CBR, para dosificaciones de 0%, 3%, 6% y 8%.

Carbajal (2022), estableció como objetivo general “evaluar de qué manera influye la adición de cenizas de madera en la estabilización de las propiedades físicas de la subrasante”. El investigador le dio un enfoque cuantitativo y un alcance explicativo, el diseño que estableció fue experimental, el tipo de muestreo utilizado fue no probabilístico. Las proporciones de ceniza para el tratamiento fue 0%, 10%, 11%, 12% y 13%, y luego de realizar los análisis se obtuvo que se genera una disminución en I. P. cuando la dosis de ceniza aumenta y sucede lo contrario con la MDS, el contenido de humedad y el valor de CBR. La MDS va de 1.91 g/cm³ a 1.97 g/cm³ para la muestra C-01 y de 1.46 g/cm³ a 1.53 g/cm³ para la muestra C-02, el contenido óptimo de humedad respectivo fue de 11.72% a 17.29% para la muestra C-01 y de 14.64% a 23.01% para la muestra C-02. El valor CBR al 95% de la MDS obtiene el mayor incremento para una dosis de 13%, el suelo natural dio un valor de 7.37% (C-01) y 4.91% (C-04) y el suelo con adición de ceniza al 13% dio 15.56% (C-01) y 11.46% (C-04).

Pareja (2022), concertó como objetivo “determinar la influencia de la adición de ceniza schinus molle en la estabilización de la subrasante”. El alcance de estudio es descriptivo, tipo aplicada y el diseño fue experimental; la relación de ceniza con respecto al peso de suelo seco que emplearon fue 3%, 5%, 7%, 10% y 13%. El índice de plasticidad en la muestra C-01 y C-05 presentan un aumento para las dosis de 3%, 7% y 10% y disminuye para 5% y 13%, en la muestra C-03 se incrementa hasta la dosis de 10% y para la de 13% reduce su IP. La máxima densidad seca y el contenido de humedad tienen comportamientos iguales frente a la incorporación de ceniza, la muestra C-01 incrementa su MDS de 1.987 g/cm³ a 2.091 g/cm³ (0% y 13% de ceniza respectivamente), su contenido de humedad óptimo de 11.05% a 14.36% (0% y 13% de ceniza respectivamente); la muestra C-

03 incrementa su MDS de 1.940 g/cm³ (0% de ceniza) a 2.088 g/cm³ (0% y 13% de ceniza respectivamente), su COH de 12.60% a 15.84% (0% y 13% de ceniza respectivamente); la muestra C-05 incrementa su MDS de 1.830 g/cm³ (0% de ceniza) a 2.034 g/cm³ (0% y 13% de ceniza respectivamente), su contenido de humedad óptimo de 14.18% a 16.84% (0% y 13% de ceniza respectivamente). El valor CBR aumenta significativamente al añadir 13% de ceniza en las tres muestras C-01, C-03 y C-05; para la primera muestra el resultado fue de 1.888% (0% de ceniza) y 22.50% (13% de ceniza), la segunda muestra resultó 1.843% y 22.40% para una dosis de 0% y 13% de ceniza, respectivamente; la tercera muestra alcanzó un valor de 1.739% (0% de ceniza) y 21.90% (13% de ceniza).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Ceniza del bagazo de la cañaduz

Al extraer el jugo de la cañaduz, lo que queda como residuo se denomina bagazo (James y Pandian, 2017).

Según la Real Academia Española [RAE] (2022), la ceniza es un “polvo de color gris claro que queda después de una combustión completa, y está formado, generalmente, por sales alcalinas y térreas, sílice y óxidos metálicos”.

En ese sentido, la ceniza del bagazo de la cañaduz es un residuo producto de la calcinación completa de la caña después de la extracción de su jugo, conformado por diversos compuestos químicos, principalmente sílices y óxidos.

2.2.1.1. Especificaciones de las cenizas para su uso como material cementante.

La organización de estándares internacionales American Society for Testing and Materials [ASTM] (2020), desarrolló la normativa de designación C618 – 19 que comprende los requisitos para el uso de “ceniza volante de carbón y puzolana

natural cruda o calcinada para su uso en hormigón”. Esta norma establece las exigencias químicas que deben cumplir las puzolanas para emplearlo como cementante, y aclara que estos requisitos no presagian el rendimiento de la ceniza, pero, permite la explicación de la uniformidad y formación del material.

Tabla 3.

Composición química de las puzolanas naturales.

Requisitos químicos	Clase		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO ₂) más óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) más óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), mín., %	70.0	50.0	50.0

Nota. La clase F, son cenizas que poseen propiedades puzolánicas, y la clase C, presenta propiedades puzolánicas y cementantes (ASTM, 2020).

2.2.2. Suelo

Según Das (2015), define al suelo como un agregado no endurecido compuesto por partículas sólidas, líquidas y gaseosas, en las partículas sólidas se encuentran la materia orgánica (estado descompuesto) e inorgánica (minerales).

Terzaghi y Peck (1978), también brinda un concepto del suelo, él menciona que son agregados naturales constituidos por partículas minerales que pueden ser fragmentados por fuerzas de baja intensidad.

De acuerdo a los conceptos mencionados, se puede sintetizar que los suelos son un conjunto de partículas de origen natural que no se han cementado y que poseen una estructura, su configuración principal son las partículas minerales inorgánicas y orgánicas, y también contienen líquidos y gases.

2.2.3. Propiedades índices de los suelos

Según Terzaghi y Peck (1978), a través de las propiedades índices se puede realizar una clasificación más precisa, estas clasificaciones son en base a las propiedades intrínsecas del suelo analizadas de forma individual y en conjunto; el

primero contempla el tamaño y la forma de los granos y el segundo la densidad relativa en suelos no cohesivos y en suelos cohesivos la consistencia.

A continuación, estudiaremos las siguientes propiedades índices: gradación, clase y consistencia; y se determinará de acuerdo a la normativa establecida por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en el manual de ensayo de materiales.

2.2.3.1. Gradación de los suelos.

Los tamaños de las partículas que compone un suelo se pueden determinar empleando el análisis granulométrico por tamizado, Terzaghi y Peck (1978) y el MTC (2017) mencionan que este método nos permite conocer de forma cuantitativa el tamaño de los granos de suelo.

El Instituto Nacional de Calidad [INACAL] (2019) dispone la norma para el análisis granulométrico denominado NTP 339.128 (revisada el 2019); a continuación, se detalla lo descrito en el documento:

1. Normas referentes.

- ASTM D 422: Standard test method for particle-size analysis of soils (Método de prueba estándar para el análisis del tamaño de partículas de suelos).

2. Equipos.

- Dos balanzas, una para los granos retenidos en el tamiz N° 10 (2.00 mm) con una sensibilidad de 0.1% y otra para los granos que pasen el tamiz N° 10 con 0.01 g de sensibilidad.

- Estufa, que pueda mantener temperaturas constantes de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

3. Materiales.

- Serie de tamices que consideren la ASTM E 11.

Tabla 4.

Serie de tamices en mm y pulgadas.

Tamices	Abertura (mm)
3"	75.00
2"	50.00
1 1/2"	37.50
1"	25.00
3/4"	19.00
3/8"	9.50
N 04	4.75
N 10	2.00
N 20	0.850
N 40	0.425
N 60	0.250
N 140	0.106
N 200	0.075

Nota. Esta tabla ha sido adaptada de "Método de ensayo para el análisis granulométrico" (p. 3), por INACAL, 2019. Copyright 2019 por INACAL.

Tabla 5.

Serie de tamices para un espaciamento de puntos uniforme.

Tamices	Abertura (mm)
3"	75.00
1 1/2"	37.50
3/4"	19.00
3/8"	9.50
N 04	4.75
N 08	2.36
N 16	1.18
N 30	0.60
N 50	0.30

Tamices	Abertura (mm)
N 100	0.15
N 200	0.075

Nota. Esta tabla ha sido adaptada de “Método de ensayo para el análisis granulométrico” (p. 4), por INACAL, 2019. Copyright 2019 por INACAL.

- Envases.
- Cepillo y brocha; para la limpieza de las mallas.

4. Muestra.

- Para la preparación de la muestra se debe realizar los procedimientos de la NTP 339.090. Parte de la preparación es separar la muestra en dos fracciones: la primera es lo retenido en el tamiz N° 10 (2.00 mm) y la otra es la muestra que pasa el tamiz N° 10 (2.00 mm); la división puede realizarle por el tamiz N° 4 (4.75 mm), N 40 (0.425 mm) o N° 200 (0.075 mm) en lugar del N° 10. La cantidad de muestra varía de acuerdo al tamaño máximo nominal que presenta la muestra, pero en la Tabla 6 se presenta una guía para la cantidad de muestra aproximada para realizar el ensayo (INACAL, 2019, NTP 339.128).

Tabla 6.

Tabla referencial sobre la cantidad de muestra para análisis por tamizado fracción retenida en el tamiz N° 10 (2.00 mm).

Diámetro nominal máximo (DNM) retenido en el tamiz N° 10 (2.00 mm)	Masa aproximada necesaria en gramos
76.2 mm (3")	5000 g
50.8 mm (2")	4000 g
38.1 mm (1 1/2")	3000 g
25.4 mm (1")	2000 g
19.0 mm (3/4")	1000 g
9.5 mm (3/8")	500 g

Nota. La tabla indica la cantidad mínima que se requiere para realizar en ensayo por tamizado de acuerdo al tamaño máximo de grano que tenga la muestra. Esta

tabla ha sido adaptada de “Método de ensayo para el análisis granulométrico” (p. 5), por INACAL, 2019. Copyright 2019 por INACAL.

- Para la fracción que pasa el tamiz N° 10 (2.00 mm), se puede ensayar con toda la muestra o parte de ella, para decidir que opción se toma, cogemos una porción del material y lo secamos en la estufa, una vez seca examinamos la resistencia de la porción con nuestros dedos, si se desprende con facilidad los terrones y el material fino se pulveriza entonces efectuamos el análisis sin previo lavado (MTC, 2017, MTC E 107).

- La cantidad para la parte que pasa el tamiz N° 10 (2.00 mm), será de 115 g para suelos arenosos y de 65 g para suelos arcillosos o limosos (INACAL, 2019, NTP 339.128).

5. Procedimiento.

Según la INACAL (2019, NTP 339.128) indica:

I. Para la fracción retenida en la malla N° 10 (2.00 mm).

Se debe tener armado la serie de tamices empezando por el tamiz de mayor abertura y en la parte final debe ir el fondo. Los tamices elegidos pueden ser los de la serie de la Tabla 4 o Tabla 5, desde el tamiz 3” (75.00 mm) hasta el N° 10 (2.00 mm).

- Primero: la muestra representativa se vierte en la serie de tamices, si el proceso es manual se debe realizar movimientos laterales y simulando una circunferencia, no se debe girar ni manipular la muestra; si el proceso es mecánico, este se realizará por 10 minutos.

- Segundo: se procede a desmontar cada tamiz, pesar y anotar lo retenido en cada tamiz.

- Tercero: Se considera terminado el proceso cuando el peso inicial y la sumatoria total de pesos retenidos en cada malla son iguales, en caso de que el último sea menor este debe ser inferior al 1% del peso inicial.

El MTC (2017, MTC E 107) especifica los procedimientos:

II. Para la fracción que pasa el tamiz N° 4 (4.760 mm).

- Primero: cuando el análisis se hace sin previo lavado se sigue el método para la fracción retenida en el tamiz N° 4.

- Segundo: si el tamizado se debe realizar con lavado, entonces tomamos la muestra de 115 g o 65 g, lo ponemos en un recipiente y lo sumergimos en abundante agua hasta que los terrones se ablanden.

- Tercero: procedemos a lavar la muestra por el tamiz N° 200 (0.075 mm), lo llevamos a la estufa, una vez seco extraemos el recipiente con la muestra, dejamos enfriar a temperatura ambiente y luego pesamos el material.

- Cuarto: realizamos el proceso de tamizado siguiendo los procedimientos para la fracción retenida en el tamiz N° 4.

Los cálculos para la gradación de los suelos se encuentran en el Anexo 4.

2.2.3.2. Consistencia de los suelos.

Cuando el suelo contiene minerales de arcilla, el suelo puede deformarse sin romperse (Crespo, 2004); esto se debe a que los minerales de arcilla adsorbieron agua. En 1900, Albert Mauritz Atterberg realizó un método para explicar la consistencia de los suelos que contienen granos finos, con diversos contenidos de humedad (Das, 2015).

Según Juárez y Rico (2005), el suelo puede encontrarse en alguno de los estados de consistencia; de acuerdo al contenido de agua (expresado en porcentaje) presente.

Das (2015), menciona que son cuatro los estados básicos y se debe al incremento de agua.

Primero: estado sólido, en el que la presencia de agua es mínima y no hay diferencia significativa en el volumen cuando se realiza el secado.

Segundo: estado semisólido, cuando el volumen disminuye cuando se somete a secado.

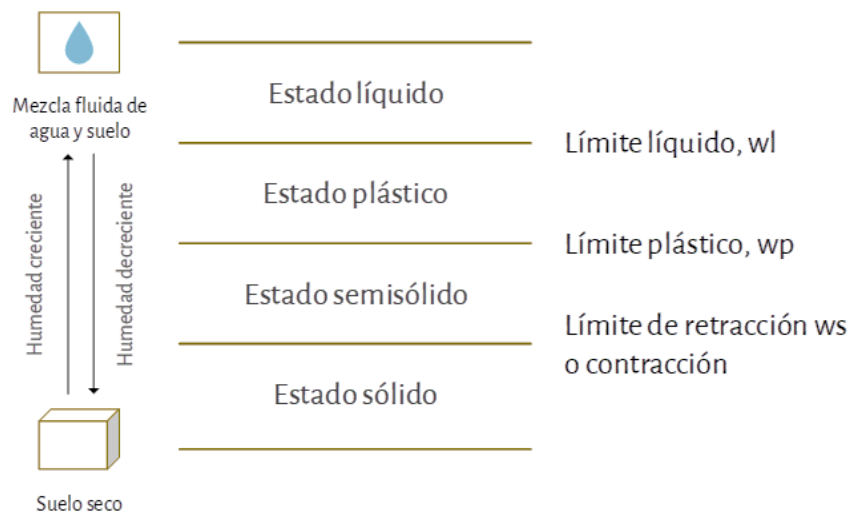
Tercero: estado plástico, cuando su comportamiento es plástico.

Cuarto: estado líquido, apariencia y comportamientos de una suspensión.

El punto de transición del estado sólido que es donde el volumen no presenta variación al semisólido se denomina límite de contracción, del estado semisólido al estado donde se presenta deformaciones que es el plástico se conoce como límite plástico y de estado plástico a estado donde se comporta como fluido se encuentra el límite líquido.

Figura 1.

Estados de consistencia y límites de Atterberg.



Nota. Adaptado de Límites de Atterberg e índices con ellos asociados (p. 45), de Lambe y Whitman, 2012, Limusa.

“La diferencia entre los valores del límite líquido (L. L.) y del límite plástico (L. P.) da el llamado índice de plasticidad (I. P.) del suelo” (Crespo, 2004).

A continuación, se detalla las normas referentes, equipos, materiales, selección de muestra y procesos que se debe realizar para calcular el L.L., L. P. he I. P. de suelos detallado en la NTP 339.129.

1. Normativas referentes.

- ASTM D 4318: Standard test method for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils (Método de prueba estándar para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos).

2. Equipos.

La NTP 339.129 (INACAL 2019) detalla los equipos necesarios para realizar el ensayo:

- Dispositivos del límite líquido: consta de una copa o cuchara denominada la copa de Casagrande, este elemento se halla suspendido de un apoyo que controla la caída en una base de látex duro. Su operación puede ser manual o eléctrica. Un acanalador de metal inoxidable o de plástico de dimensiones indicadas en la norma. El calibre que permite regular la distancia de caída de la cuchara. Contenedores o taras anticorrosivos y herméticos, balanza (aproximación de 0.01 g), tamiz N° 40 (0.425 mm) según las especificaciones NTP 350.001, frasco que permita controlar la cantidad de agua para agregar al suelo. Horno, que permita mantener una temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ($230\text{ °F} \pm 9\text{ °F}$).

- Dispositivos del límite plástico: se empleará una placa de vidrio de 30 cm x 30 cm x 1 cm de espesor; contenedores o taras anticorrosivos; balanza (aproximación de 0.01 g); tamiz N° 40 (0.425 mm) según las especificaciones NTP 350.001; frasco que permita controlar la cantidad de agua para agregar al suelo; horno, que permita mantener una temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ($230\text{ °F} \pm 9\text{ °F}$).

3. Materiales.

- Espátula, de hoja que sea flexible, de 2 cm de ancho aproximadamente y entre 10 a 13 cm de largo (MTC, 2017, MTC E 110)

4. Insumos.

El agua deberá ser destilada, o puede usarse agua destilada desmineralizada (INACAL, 2019, NTP 399.129).

5. Muestra.

- Límite líquido. Se deberá obtener una cantidad de muestra significativa entre 150 g a 200 g de aquellos suelos pasaron el tamiz N° 40, y posterior a ello se obtendrá una muestra reducida por cuarteo. A la muestra obtenida se le incorpora agua y se mezcla con una espátula en un recipiente, después se deja reposar al menos 16 horas o toda la noche, antes de iniciar el ensayo se ha de remezclar (INACAL, 2019, NTP 399.129).

- Límite plástico. Para realizar este ensayo, se toma 20 g de la mezcla realizada para el límite líquido (después del remezclado). Agregamos suelo seco que pasó el tamiz N° 40 para disminuir el contenido de humedad, de modo que nos permita enrollar el suelo sin que se adhiera a las manos, rodándola sobre la placa de vidrio (INACAL, 2019, NTP 399.129).

6. Procedimiento.

Los procedimientos mencionados son los establecidos en la NTP 339.129 (INACAL, 2019, NTP 399.129).

- Límite líquido (método multipunto). Primero: de las dos raciones extraídas con la cuchara, la primera deberá colocarse presionándola en la copa Casagrande en la zona donde la cuchara reposa sobre la base, luego se deberá esparcir hasta una profundidad cerca de 10 mm, de manera que se obtenga una superficie horizontal. Se debe cuidar que no se produzca burbujas de aire en la mezcla con la

mínima cantidad de pasadas de espátula. El resto de mezcla no usado deberá mantenerse en el recipiente cubierto con un paño húmedo para mantener la humedad.

Segundo: con el acanalador, se debe realizar una abertura colocando el equipo en la parte más alta de la copa y deslizándola hasta la parte inferior. Aquellos suelos donde no se puede realizar la abertura en un movimiento se deberá abrir con varias pasadas.

Tercero: antes de realizar los golpes se debe revisar que no haya sobras de suelo en la base de la copa; luego por acción manual o mecánica, giramos la manija que eleva y deja caer la copa manteniendo de 1.9 a 2.1 golpes/segundo, se repite esta acción hasta que se visualice una unión de mínimo 1/2" (13mm) en la abertura.

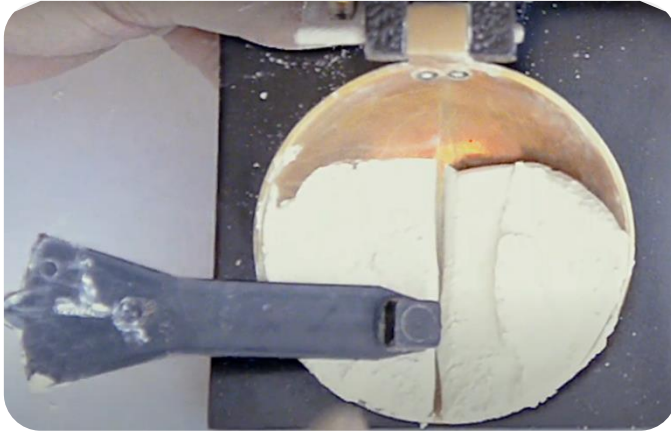
Cuarto: debe observar que ambos lados de la abertura se deslicen en conjunto, si se observa que el cierre de la abertura fue por burbujas de aire, debe volver a obtener la superficie horizontal del primer paso y añadir un poco cantidad de mezcla de manera que se compense las perdidas por la operación realizada, luego se debe repetir las instrucciones del primer al tercer paso. Si se hizo varias repeticiones y la abertura cierra en menos de 25 golpes, se concluirá que el límite líquido no se pudo determinar, y se indicará como suelo no plástico (sin necesidad de realizar el ensayo de límite plástico).

Quinto: cerrada la abertura a la distancia mínima indicada en el ítem tercero, apuntar el número de golpes (se le denominará N). Luego extraemos la parte del suelo donde se cerró la abertura, para ello, tomamos la espátula y la maniobramos de un extremo de la cuchara a otro formando un ángulo recto con la abertura, es importante que la espátula pase por la zona donde se cerró, para mayor referencia

ver la Figura 3; se coloca la porción en una tara (pesar el recipiente antes de colocar la muestra), se registra el peso y se cubre para mantener la humedad.

Figura 2.

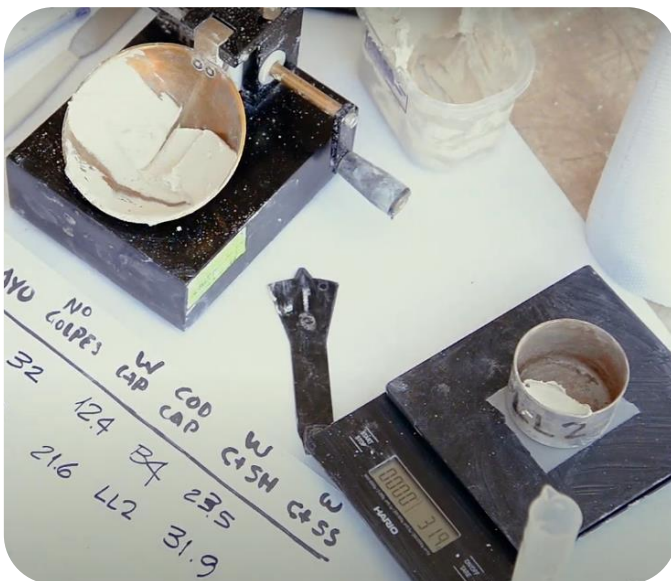
Cierre de la abertura, longitud mínima de 13 mm.



Nota. (Geotecnia Moderna, 2020).

Figura 3.

Visualización de la zona extraída.



Nota. (Geotecnia Moderna, 2020).

Sexto: lo restante de la cuchara se devuelve al recipiente donde se realizó la mezcla inicial. Para continuar se debe limpiar y secar la copa y el acanalador, y colocar la copa a su posición inicial.

Séptimo: combinar nuevamente la mezcla y añadir agua de manera controlada de tal forma que se cierre la abertura a menor cantidad de golpes. Se repetirá los pasos del primero al sexto hasta obtener 3 cierres que comprendan entre 15 a 25 golpes, 20 a 30 golpes y 25 a 35 golpes.

Octavo: determinaremos el contenido de humedad de muestra extraída según la NTP 339.127. Cabe resaltar que, el registro del peso es al instante de extraer la muestra, si hubiera interrupciones en el ensayo que pase los 15 minutos se debe pesar en el instante que se produce la interrupción.

- Límite plástico. Primero: de los 20 g, tomamos 1.5 g a 2.0 g, con ello, formamos un cuerpo elipsoidal sobre la placa de vidrio con ayuda de una mano. Luego enrollamos la masa haciendo ligera presión con los dedos y desplazándolos hacia adelante y atrás, esto hará que se forme un hilo y se debe mantener un diámetro uniforme en toda su extensión. Se termina de realizar el hilo hasta que el diámetro sea 1/8" (3.2 mm), en un tiempo máximo de 2 minutos. Si los suelos son frágiles (baja plasticidad) se deberán enrollar con la yema del pulgar. Si el hilo se rompe, cada uno de las partes se enrollará hasta los 3.2 mm de diámetro. La norma menciona que, para proseguir con el ensayo, debe ser posible formar de nuevo el cuerpo elipsoidal y volver a enrollar. Cuando el diámetro de hilo llegue a los 3.2 mm se parte en varios pedazos, si las grietas se muestran antes de llegar al diámetro mencionado se considera como punto final, puesto que, anteriormente se alcanzó el diámetro de 3.2 mm.

Segundo: se coloca las partes del hilo agrietado en un recipiente ya pesado.

Tercero: repetir los dos primeros pasos hasta obtener un peso de 6 g.

Cuarto: obtener un segundo recipiente, para esto, realizamos del paso uno al tres. Con la NTP 339.127 se determinará el contenido de humedad de los especímenes.

7. Cálculos.

Según lo establecido por el INACAL (2019, NTP 339.129).

- Límite líquido (multipunto). Se representa de manera gráfica en una escala semilogarítmica, siendo el eje de las abscisas (escala logarítmica) la cantidad de golpes de la copa Casagrande y en las ordenadas (escala aritmética) el contenido de humedad.

Se requiere de tres puntos para trazar una línea de tendencia que pase por ellos, luego se traza una línea vertical en 25 golpes hasta intersectar con la línea de tendencia y este se proyecta al eje de ordenadas, este valor (contenido de humedad) es el límite líquido del suelo.

- Límite plástico. Es el promedio obtenido del contenido de humedad de los dos especímenes.

Si el rango entre los contenidos de humedad es mayor a lo establecido en la Tabla 7, se tiene que volver a realizar el ensayo.

Tabla 7.

Estimados de precisión.

Índice de precisión y tipo de ensayo	Desviación estándar	Rango aceptable de dos resultados
Precisión de un operador simples:		
L. L.	0.80	2.40
L. P.	0.90	2.60
Precisión multilaboratorio:		
L. L.	3.50	9.90
L. P.	3.70	10.60

Nota. Adaptado de “Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos” (p. 19), por INACAL, 2019. Copyright 2019 por INACAL.

- Índice de plasticidad. Con la ecuación 1 se obtiene el valor del I. P.

Ecuación 1. *Expresión para obtener el I. P.*

$$I.P. = L.L. - L.P.$$

Donde:

I. P. = Índice de plasticidad.

L. L. = Límite líquido.

L. P. = Límite plástico.

Se establece como suelo no plástico (NP) aquellos cuyo límite plástico sea mayor o igual que el límite líquido, o cuando uno de ellos no se pueda determinar.

2.2.3.3. Clase de los suelos.

La similitud en las propiedades de los suelos ha conllevado a una clasificación de grupos y subgrupos. Actualmente, contamos con dos métodos que cuentan con criterios los cuales ayudan a definir la clase del suelo, el primero fue establecido por la American Association of State Highway Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes), y se denomina Sistema AASHTO por sus siglas en inglés y el segundo se conoce como Unified Soil Classification System, traducido como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Das, 2015).

1. Método de clasificación según el sistema AASHTO.

Según Montejó (2002), este sistema posee una estructura de ocho grupos, los suelos inorgánicos van desde el símbolo A-1 al A-7 y los suelos con alto porcentaje de materia orgánica pertenecen al grupo A-8.

A continuación, se describe esos grupos:

- Suelos granulares: Son los suelos que contienen 35% o menos, de fracción fina que pasa el tamiz N° 200. Estos suelos pertenecen a los grupos A-1, A-2 y A-3.

Grupo A-1: Son aquellos suelos con una granulométrica bien graduada, conformado por piedra, grava, arena, con o sin material ligante.

Subgrupo A-1a: En el material predomina la piedra o grava.

Subgrupo A-1b: Incorpora a suelos constituidos principalmente por arena de grano grueso.

Grupo A-2: Abarca a materiales que contengan material fino menor a 35%.

Subgrupos A-2-4 y A-2-5: Aquellos suelos que tengan 35% o menos de material fino y que la fracción que pasa por el tamiz N° 40 tengan las mismas propiedades del grupo A-4 y A-5, respectivamente.

Subgrupos A-2-6 y A-2-7: Las condiciones son similares a los subgrupos anteriores, la diferencia es que la fracción que pasa el tamiz N° 40 poseen las mismas cualidades que los grupos A-6 y A-7, respectivamente.

Grupo A-3: Los suelos que contengan arenas de grano fino que generalmente están presentes en las playas o ríos con poca grava y arena gruesa están dentro de este grupo.

- Suelos finos limo arcillosos: Comprende a los que suelos con más del 35% del material fino que pasa el tamiz N° 200.

Grupo A-4: En este grupo se encuentran los suelos con limos con muy baja plasticidad. Además, incluye materiales con limo, grava y arena hasta un 64%.

Grupo A-5: Semejante al grupo anterior, no obstante, su límite líquido es elevado y son elásticos.

Grupo A-6: Las características de la arcilla plástica es el que mejor representa a este grupo. Por lo menos un 75% debe pasar el tamiz N° 200, también están dentro los suelos arcillo-arenosos con grava y arena cuyo porcentaje sea menor al 64%.

Grupo A-7: Estos suelos son semejantes al grupo A-6, excepto que tienen un comportamiento elástico, esto quiere decir que su L. L. es elevado.

Subgrupo A-7-5: Son suelos con índices de plasticidad menores en 30 respecto al límite líquido.

Subgrupo A-7-6: Son suelos con índices de plasticidad mayores en 30 respecto al límite líquido.

Índice de grupo (I. G.): Los índices de grupo acompañan a la denominación del subgrupo entre paréntesis; los índices de grupo que resultan de 0 a 4 corresponde a los suelos granulares; aquellos entre 8 y 12 generalmente son suelos con mayor presencia de limos y entre 11 y 20 se tiene a los suelos con mayor presencia de arcillas.

Según Montejo (2002), la siguiente expresión nos permite hallar el I. G.

Ecuación 2. *Índice de grupo.*

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(L.L. - 40)] + 0.01(F - 15)(I.P. - 10)$$

Donde:

IG = Índice de grupo.

F = Porcentaje del suelo que pasa por el tamiz N° 200 expresado como número entero.

L. L. = Límite líquido.

I. P. = Índice de plasticidad.

Los criterios para clasificar los suelos según el método AASHTO se encuentran en el Anexo 5.

2. Método de clasificación según el sistema SUCS.

Para describir este método se considera el texto de Montejo (2002), él menciona que el método de clasificación SUCS ha sido elaborado por Arturo Casagrande. La clasificación SUCS considera la siguiente división:

- Suelos de grano grueso.
- Suelos de grano fino.
- Suelos orgánicos.

Si la cantidad retenida en el tamiz N° 200, es mayor a 50% son suelos de grano grueso, en caso contrario son suelos de grano fino.

Suelos gruesos: En esta división se encuentran las gravas (su símbolo es G), y arenas (de símbolo S). Lo retenido en el tamiz N° 4 son las gravas y lo pasante son las arenas; si lo retenido es mayor al 50% del peso entonces pertenece al grupo G y si es menor o igual al 50% será del grupo S.

Las gravas y arenas se separan en cuatro grupos: grava bien graduada (GW), grava mal graduada (GP), grava limosa (GM) y grava arcillosa (GC); arena bien graduada (SW), arena mal graduada (SP), arena limosa (SM) y arena arcillosa (SC).

Grava bien graduada: Es cuando la proporción de finos presente en la grava es menor del 5%, el coeficiente de curvatura (C_c) comprende entre 1 y 3 y el coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor o igual a 4.

Grava mal graduada: Son aquellos donde el porcentaje de finos presente en la grava es menor del 5%, el C_c es menor a 1 o mayor a 3 y/o el C_u es menor a 4.

Grava limosa: Están incluidos cuando el porcentaje de finos presentes en la grava es mayor a 12% y el índice de plasticidad (IP) es menor a 4.

Grava arcillosa: Están incluidos cuando el porcentaje de finos presentes en la grava es mayor a 12% y IP es mayor a 7.

Cuando el porcentaje de finos presentes en la grava está entre 5% y 12% se emplea símbolos dobles, por ejemplo, GW-GM.

Arena bien graduada: Es cuando la proporción de finos presente en la arena es menor del 5%, el coeficiente de curvatura (C_c) comprende entre 1 y 3 y el coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor o igual a 6.

Arena mal graduada: Son aquellos donde el porcentaje de finos presente en la arena es menor del 5%, el C_c es menor a 1 o mayor a 3 y/o el C_u es menor a 6.

Arena limosa: Están incluidos cuando el porcentaje de finos presentes en la arena es mayor a 12% y el índice de plasticidad (IP) es menor a 4.

Arena arcillosa: Están incluidos cuando el porcentaje de finos presentes en la grava es mayor a 12% y IP es mayor a 7.

Cuando el porcentaje de finos presentes en la arena está entre 5% y 12% se emplea símbolos dobles, por ejemplo, SW-SM.

En cuanto al coeficiente de uniformidad (C_u) y el de curvatura (C_c) están definidas bajo la siguiente ecuación:

Ecuación 3. *Coeficiente de uniformidad y curvatura.*

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Donde:

D10: Diámetro de la abertura correspondiente al 10% del porcentaje que pasa del suelo.

D30: Diámetro de la abertura correspondiente al 30% del porcentaje que pasa del suelo.

D60: Diámetro de la abertura correspondiente al 60% del porcentaje que pasa del suelo.

Suelos finos: El sistema SUCS divide los suelos finos en tres grupos: arcillas inorgánicas (C), limos inorgánicos (M) y limos y arcillas orgánicos (O). Estos suelos se subdividen en dos grupos de acuerdo a su L. L. Si el L. L. es inferior de 50% se agrega el símbolo L (Low bility) y si es superior se añade el símbolo H (High compresibility). Los subgrupos que se obtienen son los siguientes:

ML = Limos inorgánicos de baja compresibilidad.

OL = Limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad.

CL = Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.

CH = Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

MH = Limos inorgánicos de alta compresibilidad.

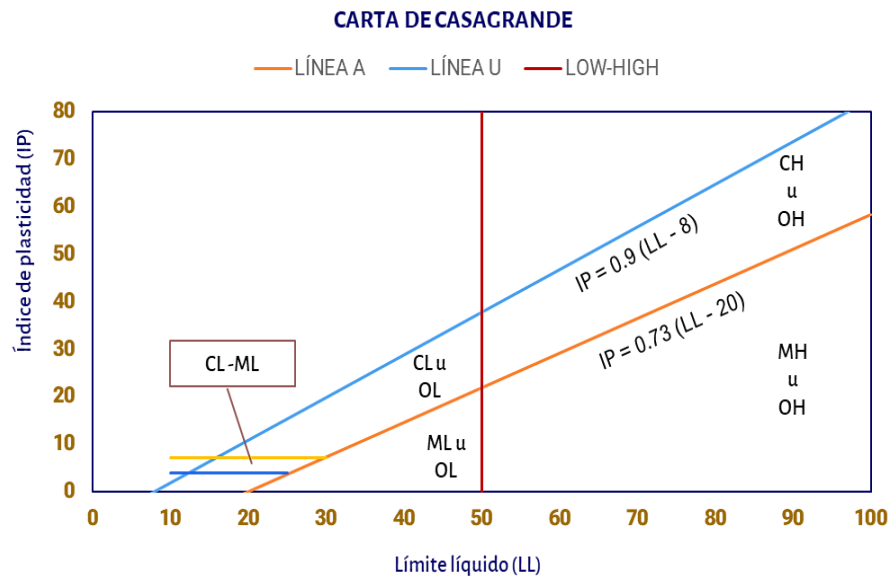
OH = Arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad.

Pt = Suelos altamente orgánicos, como las turbas.

Para clasificar los suelos finos se emplea la carta de plasticidad; en la Figura 4, se identifica dos líneas, la línea A que separa las arcillas, limos y suelos orgánicos; la línea B que divide los suelos de alta y baja compresibilidad.

Figura 4.

Gráfica de la carta de plasticidad.



Nota. Adaptado de *Grafica de plasticidad* (p. 84), de Das, 2015, Cengage Learning. Copyright 2015 por Cengage Learning.

Los criterios para clasificar los suelos según el método AASHTO se encuentran en el Anexo 6.

2.2.4. Propiedades mecánicas de los suelos

Según la Real Academia Española (RAE, 2022), define propiedad como “atributo o cualidad esencial de alguien o algo” y precisa que la mecánica es “la parte de la física que trata del equilibrio y del movimiento de los cuerpos sometidos a cualquier fuerza”, integrando ambas definiciones se puede señalar que estas propiedades son cualidades del material relacionados con su capacidad de “resistir fuerzas o deformaciones” (Infinitia Industrial Consulting, 2022).

Las principales propiedades mecánicas que veremos son la compactación de los suelos (Proctor modificado) y la resistencia que ofrece los suelos al corte (relación de soporte de california).

2.2.4.1. Compactación.

Como los otros ensayos, se estandarizó el método para determinar la compactación de un suelo en el laboratorio; esta norma tiene como código NTP 339.141. A continuación, se describe todo lo referente al método según el INACAL (2019, NTP 339.141).

1. Alcance.

Hay tres procedimientos para determinar el peso unitario seco y su contenido de humedad, para mayor información ver el Anexo 7.

Si el suelo contiene más de 5% de fracción gruesa se debe hacer correcciones al peso unitario y contenido de humedad.

2. Referencias normativas.

ASTM D 1557-91: Test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort 56,000 pie-lbf/pie³ (2,700 kN-m/m³) (Método de prueba para las características de compactación del suelo en laboratorio usando esfuerzo modificado 56,000 pie-lbf/pie³ (2,700 kN-m/m³)).

3. Equipos.

- Ensamblaje del molde: tipo ahusado, con un diámetro interno uniforme y una altura de 16.7 mm/m (0.200 pulg/pie) máximo y tipo partido. Collar de extensión.

- Molde de 4 pulgadas: diámetro interior promedio de 101.6 ± 0.4 mm (4" \pm 0.016") y 116.4 ± 0.5 mm (4.584" \pm 0.018") de altura, un volumen de 944 ± 14 cm³ (0.0333 ± 0.0005 pie³).

- Molde de 6 pulgadas: diámetro interior promedio de 152.4 ± 0.7 mm (6" \pm 0.026") y 116.4 ± 0.5 mm (4.584" \pm 0.018") de altura, un volumen de 2124 ± 25 cm³ (0.075 ± 0.0009 pie³).

- Pisón o martillo: La altura de caída del pisón será de $457.2 \text{ mm} \pm 1.6 \text{ mm}$ ($18'' \pm 0.05''$). Su masa será de $4.54 \pm 0.01 \text{ kg}$ ($10 \pm 0.02 \text{ lb-m}$), salvo se ajuste a las masas del ASTM D 2168. La parte que impacta el suelo tiene que ser plano y circular, con un diámetro de $50.8 \text{ mm} \pm 0.13 \text{ mm}$ ($2'' \pm 0.005''$), en caso de usar el cilindro de 152.4 mm ($6''$) el radio será de $73.7 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ ($2.9'' \pm 0.02''$).

- Balanza: con una aproximación de 1 g.

- Horno de secado: que permita mantener una temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($230 \text{ }^\circ\text{F} \pm 9 \text{ }^\circ\text{F}$).

4. Materiales.

- Regla recta: de una longitud mayor o igual de 254 mm ($10''$). Si la regla es de un grosor mayor que 3 mm ($1/8''$) este deberá ser biselado.

- Tamices o mallas: de 19 mm ($3/4''$), 9.5 mm ($3/8''$) y N° 4 (4.75 mm) conforme a la ASTM E 11).

- Herramientas de mezcla: tales como cucharas, espátula, paleta, otros.

5. Muestra.

La cantidad de muestra necesaria para el método o procedimiento A y B es de 16 kg (35 lbm) y para C de 29 kg (65 lbm) de suelo seco; 23 kg (50 lbm) y 45 kg (100 lbm) de suelo húmedo, respectivamente.

6. Procedimiento.

Los suelos compactados no deberán ser usados nuevamente.

- Método de preparación húmeda (recomendado):

Se pasa el suelo por el tamiz N° 4 (4.75 mm), $3/8''$ (9.5 mm) o $3/4''$ (19 mm), dependiendo del procedimiento (A, B o C).

Primero: Se ha de dividir un mínimo de cuatro secciones, humedecer de manera que tenga un contenido de humedad óptimo. La variación del contenido de

humedad será de 2% y se debe obtener dos muestras secas y dos húmedas para formar la curva de compactación. Los aumentos no deben exceder de 4%.

Segundo: Para los procedimientos A y B se empleará aproximadamente 2.3 kg o 5.9 kg para el procedimiento C. Se deberá considerar un tiempo de permanencia antes de realizar la compactación de acuerdo a la Tabla 8.

Tabla 8.

Tiempo mínimo de duración sumergido de los suelos según su clase.

Clasificación	Tiempo de permanencia mínimo, h
GW, GP, SW o SP	No se requiere
GM o SM	3
Todos los demás suelos	16

Nota. Adaptado de “*Tiempo de permanencia requerido de especímenes en saturación*” (p. 28), por INACAL, 2019. Copyright 2019 por INACAL.

- Método de elaboración en seco:

Verificar la humedad de la muestra, en caso sea elevada se debe reducir por secado al aire o al horno a una temperatura máxima de 60 °C (140 °F). Parta el agregado sin fragmentar las demás partículas. Tamizar la muestra por la malla N° 4 (4.75 mm), 3/8” (9.5 mm) o 3/4” (19 mm).

Seguir los dos pasos del método de preparación en húmedo.

- Compactación: se ha de registrar la masa del plato base y molde.

Ensamblar los equipos (molde, collar y plato base). La compactación debe realizarse en una superficie rígida y uniforme con un cilindro de concreto de 91 kg (200 lbm) o mayor.

La compactación será en cinco capas, se coloca el suelo en el molde y se distribuye en capas casi uniformes; anterior al proceso de compactación, el suelo en el molde no debe estar suelto ni esponjoso, para ello se emplea el pisón manual o cilindro de 2” de diámetro (5 mm). Las siguientes cuatro capas siguen el mismo

proceso, al finalizar las capas deberán tener similar grosor. La última capa deberá pasar el collar, una altura máxima de 6 mm (1/4"), en caso la última capa compactada quede por debajo del molde se descarta el espécimen. Los golpes a compactar dependen del método o procedimiento (A, B y C).

Enrasar con regla recta la zona superior e inferior del molde, si se produce un hoyo, se puede rellenar con el suelo residual al enrasar y presionar con los dedos y volver a enrasar.

Determinar la masa del espécimen en gramos. Finalmente se extrae dos partes del espécimen (suelo suelto) aproximadamente 500 g para obtener el contenido de humedad, hacer lo mismo con las otras cuatro tres secciones separadas al inicio del ensayo.

Los cálculos para determinar la MDS de un suelo se detalla en el Anexo 8.

2.2.4.2. Resistencia de los suelos.

El ensayo de código MTC E 132 especifica los equipos, materiales, procedimientos y cálculos para la obtención de la resistencia del suelo expresado en porciento (MTC, 2017, MTC E 132).

1. Referencias normativas.

ASTM D 1883: Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils.

2. Equipos.

- Prensa y cilindro de penetración de forma circular (49.63 ± 0.13 mm o 1.954 ± 0.005 "), superficie de 19.35 cm² (3 pulg²) y longitud mayor o igual a 101.6 mm (4").

La base se podrá desplazar hacia el cabezal a una velocidad de 1.27 mm/min (0.05 pulg/min). El sistema de medición de carga será de 44.5 kN (10000 lbf) o superior y la mínima será de 44 kN (10 lbf) o menor.

- Molde cilíndrico de metal, las medidas deben ser: diámetro interior de 152.4 mm \pm 0.66 mm (6" \pm 0.026"), altura de 177.8 mm \pm 0.46 mm (7" \pm 0.018").

- Un collar metálico con altura de 50.8 mm (2") y una placa base con espesor de 9.53 mm (3/8"), tendrá perforaciones de 1.6 mm (28 1/16") con distancia uniforme entre ellas.

- Disco espaciador metálico, cuya forma es circular, su diámetro exterior es de 150.8 mm (5 15/16") y espesor de 61.37 mm \pm 0.127 mm (2.416" \pm 0.005"), se emplea como falso fondo para la compactación.

- Pisón para la compactación.

- Instrumento que permite medir la expansión formado por: una placa metálica perforada, diámetro de 149.2 mm (5 7/8"), sus perforaciones tendrán el mismo diámetro que las de la placa base. En el centro tendrá un vástago con un sistema de tornillo que permita graduar la altura.

- Trípode, se apoyará en el molde y tendrá sujeto un deformímetro, el vástago debe coincidir con la placa, para poder mensurar la expansión; el deformímetro o dial tendrá una precisión de 0.025 mm (0.001").

- Una o dos pesas de metal, cuya masa total será 4.54 kg \pm 0.02 kg, pesas metálicas ranuradas con masa de 2.27 kg \pm 0.02 kg. El diámetro de ambas pesas debe ser de 149.23 mm a 150.81 mm (5 7/8" a 5 15/16"), la pesa anular tiene un agujero central de 52.98 mm (2 1/8") de diámetro.

- Dos diales, con divisiones de 0.001" (0.025 mm) y un recorrido mínimo de 1" (25 mm), un dial será acoplado a la prensa.

- Tanque o estructura con agua limpia donde se pueda sumergir los moldes.
- Horno que mantenga una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Balanzas, con capacidad de 20 kg y 1000 g, y de 1 g y 0.1 g de sensibilidad, respectivamente.

- Tamices del N° 4 (4.76 mm), 3/4" (19.05 mm) y 2" (50.80 mm).
- Herramientas misceláneas.

3. Muestra.

La preparación del ejemplar se realizará bajo el método descrito en la norma NTP de códigos 339.141 o 339.142.

La compactación se realiza en un molde de 6" (152.4 mm), en caso de aquellos materiales que pasen el tamiz 3/4" (19 mm) en un 100%, se empleará la totalidad de la muestra sin modificación; en caso exista material retenido en el tamiz 3/4" (19 mm), este será reemplazado en una cantidad igual por material pasante el tamiz 3/4" (19 mm).

4. Procedimiento.

- Se sumerge el espécimen durante cuatro días (96 horas). Se prepara la muestra conforme lo indicado para ensayo de compactación con energía modificada. Si 75% o más de la muestra pasa el tamiz 3/4" (19.1 mm), se usa el material pasante para el ensayo; en cambio, si el 25% o más es retenido en el tamiz 3/4" (19.1 mm), se cambia lo retenido por material pasante en el tamiz 3/4" (19.1 mm) y N° 4 (4.75 mm).

- Preparada la muestra se toma un aproximado de 5 kg por cada ensayo CBR.

- Previo al ensayo se debe conocer el peso unitario seco máximo y su correspondiente contenido de humedad, al suelo preparado se le añade agua en caso falte para alcanzar su contenido de humedad óptimo.

- Se registra la masa del molde base, collar, disco espaciador y papel filtro en conjunto.

- Luego se inicia con la compactación del suelo (ídem proctor modificado), el número de capas será de cinco (5) y la cantidad de golpes en cada capa será de acuerdo a la clase de suelo. Se realizará tres (3) o nueve (9) ensayos; en suelos granulares, será de 55, 26 y 12 golpes por capa. En caso de sumergir por 96 horas, se toma 100 g o 500 g de muestra al inicio y otra al final de la compactación y se mezcla, para determinar el contenido de humedad según la NTP 339.127; caso contrario, se extrae de la parte central de la probeta luego de la penetración.

- Después de la compactación, se retira el collar, se enrasa con la regla recta; en caso de producirse vacíos se rellena con material despendido, se presiona y se vuelve a enrasar.

- Retiramos el molde de la placa base y se vuelve a colocar de manera invertida, se coloca el papel filtro entre el molde y la base, se registra la masa total.

- Los pasos para la sumergir el espécimen: en el ensamble anterior se coloca la placa con vástago, encima se pone los anillos suficientes para completar la sobrecarga tal, que ocasione una presión semejante a las capas que irán por encima del suelo ensayado. La masa será de 2.27 kg aproximadamente, y la sobrecarga deberá ser menor a 4.54 kg. Con el trípode y el dial se leerá el hinchamiento al inicio, luego a las 24 h, 48 h, 72 h y 96 h.

- Finalizado el tiempo de inmersión se retira el espécimen y se deja escurrir por 15 minutos en posición normal (no inclinar), enseguida se quita la sobrecarga y la placa base perforada. Enseguida se pesa y se anota.

- Es de importancia que después de retirar la muestra de la sumersión no pase mucho tiempo para iniciar la penetración.

- El ensayo de penetración se realiza: se emplea una sobrecarga que reproduzca una intensidad de carga similar al peso del pavimento (± 2.27 kg de aproximación), y no debe ser menor de 4.54 kg. Se asienta el pistón después de colocar la sobrecarga encima de la muestra, con el fin de prevenir un empuje de manera ascendente por dentro del agujero de las pesas. Coloque la muestra en la parte central de la prensa para estar en contacto con el pistón de penetración (en caso de sumersión agregar las demás sobrecargas empleadas). Con el dial medidor en el pistón o cilindro aplicamos una fuerza de 5 kg (50 N) para asentar el cilindro. Con el mecanismo de la prensa se somete la carga sobre el pistón, la velocidad de penetración será de 0.05 pulg/min (1.27 mm/min). En prensas manuales se utilizará el dial y un cronometro.

Se registran las lecturas para las penetraciones de la Tabla 9.

Tabla 9.

Penetraciones en milímetros y pulgadas.

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

Milímetros	Pulgadas
7.62	0.300
10.16	0.400
12.70	0.500

Nota. Adaptado de “Penetración” (p. 235), por MTC, 2017. Copyright 2016 por MTC.

- Por último, se desarma el molde y se extrae de la parte superior (zona donde se hizo la penetración), para determinar su humedad.

Los cálculos para determinar el CBR de un suelo se detalla en el Anexo 9.

2.2.5. Consideraciones del suelo como subrasante

Uno de los componentes (como se indica en el Manual de carreteras sección suelos, geotecnia y pavimentos) de un pavimento es la subrasante. Según el MTC (2014), este componente es la superficie superior del relleno (terraplén) o fondo de la explanación, es de importancia que los suelos por debajo de la subrasante posean determinadas características, puesto que, debe soportar el resto de los componentes del pavimento y no sufra deformaciones. El documento también refiere que, aquellos suelos que tengan un índice de CBR inferior a 6% es de carácter obligatorio estabilizar o mejorar el suelo. La subrasante se categoriza según su índice CBR (véase la Tabla 10).

Tabla 10.

Condiciones de la subrasante según el CBR.

Categorías de subrasante	CBR
S0- Subrasante inadecuada	CBR < 3%
S1- Subrasante insuficiente	De CBR \geq 3% a CBR < 6%
S2- Subrasante regular	De CBR \geq 6% a CBR < 10%
S3- Subrasante buena	De CBR \geq 10% a CBR < 20%
S4- Subrasante muy buena	De CBR \geq 20% a CBR < 30%

Categorías de subrasante	CBR
S5- Subrasante excelente	CBR \geq 30%

Nota. Tomado de “*Categorías de sub rasante*” (p. 37), por (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2014). Copyright 2004 por MTC.

2.3. Marco conceptual

1. Aditivo.

Producto químico o mineral (o mezcla de estos) que modifica una o más propiedades de un material (MTC, 2018).

2. Agregado.

Componente que se obtiene luego de haber triturado o fragmentado las rocas (artificial) o también resulta de la desintegración natural, ambos procesos generan agregados de diferentes tamaños (MTC, 2018).

3. Agregado fino.

Componente que proviene de la desintegración de las rocas, cuyo tamaño de la partícula puede llegar hasta 4.75 mm (MTC, 2018).

4. Agregado grueso.

Materiales originados a partir de la desintegración o trituración de las rocas, considerados a partir de un tamaño mínimo de 4,75 mm (MTC, 2018).

5. Análisis granulométrico.

Procedimiento mediante el cual se obtiene la separación de las partículas según tamaño haciendo uso de tamices (MTC, 2018).

6. Arcillas.

Es una composición de minerales arcillosos, sus partículas pueden llegar a ser muy finas de dimensiones incluso menores a 2 micrómetros (0,002 mm) (MTC, 2018).

7. Arena.

Material constituido por pequeños granos de mineral obtenidos de la roca, estos granos pueden ser desde 4,75 mm hasta 0.075 mm (MTC, 2018).

8. Cal hidratada.

Es el producto de la interacción de la cal viva u oxido de calcio con el agua, se obtiene un producto con apariencia cristalina y no posee color.

9. Ceniza volante.

Son remanentes que se produce al deflagrarse el carbón (Huaquisto y Belizario, 2018).

10. Consistencia.

Propiedad del suelo que determina su capacidad de deformación (MTC, 2016, Manual de ensayos).

11. Contenido de humedad.

Es el valor que indica la cantidad de agua presente en el suelo, este valor se puede calcular al aplicar la sustracción de pesos entre la masa que contiene agua y la masa que fue secada en horno u otro equipo similar (MTC, 2018).

12. Contenido óptimo de humedad.

Es la cantidad de agua que requiere un suelo, de tal forma que al compactar los granos se acomoden alcanzando su máxima densidad (ABC Geotechnical Consulting, 2024).

13. Desviación estándar.

Mide la variación que existe en un grupo de datos, los valores con mayor dispersión generan una mayor desviación estándar (Minitab, 2023).

14. Dial.

Superficie graduada de forma variable, que a través de un agua u otro tipo de objeto se puede determinar magnitudes, como velocidad, voltaje, etc. (Real Academia Española [RAE], 2022).

15. Estabilización de suelos.

Es un proceso en el que los suelos son sometidos para mejorar sus propiedades físico-químicos y así reducir problemas estructurales (MTC, 2018).

16. Fango.

Mezcla de tierra, agua estancada y materiales orgánicos que forman barro (Real Academia Española [RAE], 2022).

17. Grava.

Componentes obtenidos por medios naturales como la desintegración de rocas o mecánicos como la trituración de rocas (MTC, 2018).

18. Hormigón.

Mezcla aglomerante a base de piedras de diferente tamaño, arena, agua y suele mezclarse con cemento, las proporciones obedece a un diseño (Real Academia Española [RAE], 2022).

19. Índice de plasticidad.

Es la diferencia porcentual entre el L. L. y L. P. de un suelo (MTC, 2018).

20. Limite líquido.

Contenido de agua del suelo entre el estado plástico y el líquido de un suelo (MTC, 2018).

21. Limite plástico.

Contenido de agua de un suelo entre el estado plástico y el semi sólido (MTC, 2018).

22. Limos.

Partículas minerales que normalmente tiene un rango de dimensión entre 0.02 y 0.002 mm (MTC, 2018).

23. Materia orgánica.

Son elementos cuya composición principal es el carbono (MTC, 2018).

24. Material cementante.

La función principal de este material es la adhesión y a su vez la cohesión, lo que permite la unión de los agregados esto hace que se forme una masa con propiedades físicas y mecánicas (Universidad de Sonora, s/f).

25. Máxima densidad seca.

Es aquella cantidad de masa máxima que puede alcanzar un material por unidad de volumen luego de ser compactado, teniendo en cuenta su humedad óptima (MTC, 2018).

26. Pavimento.

Superficie horizontal constituida por capas, que sirve para soportar esfuerzos verticales (MTC, 2018).

27. Proctor estándar.

Procedimiento que sirve para hallar la MDS expresado en g/cm^3 , así como, el COH bajo escenarios donde se aplica cargas de fuerza alrededor de 600 kN-m/m³ (GEOCON Servicios de Ingeniería S.A.C., 2016).

28. Proctor modificado.

Tiene el mismo objetivo del proctor modificado con la diferencia que en este método se aplica cargas de fuerza alrededor de 2700 kN-m/m³ (GEOCON Servicios de Ingeniería S.A.C., 2016).

29. Relación de soporte de california (CBR).

Ensayo que se utiliza para medir la resistencia de un suelo frente a esfuerzos de penetración (MTC, 2018).

30. Subrasante.

Capa del suelo cuya función principal es proporcionar un apoyo uniforme y resistente a esfuerzos donde se construirá el pavimento (MTC, 2018).

31. Tamiz.

Instrumento o equipo empleado en los laboratorios, que sirve para separar los granos de los suelos según sus tamaños (MTC, 2018).

32. Terraplén.

Son estructuras conformadas a base de tierra compactada que sirve para elevar una superficie (MTC, 2018).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La influencia en las propiedades índices y mecánicas de un suelo de subrasante por la adición de ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui es significativa, 2021.

3.1.2. Hipótesis específicas

1. La influencia en el índice de plasticidad de un suelo de subrasante por la adición de ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui es significativa.

2. La influencia en la máxima densidad seca de un suelo de subrasante por la adición de ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui es significativa.

3. La influencia en la relación de soporte california de un suelo de subrasante por la adición de ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui es significativa.

3.2. Método de investigación

El método que se ha llevado a cabo es el hipotético – deductivo, el cual permite cumplir con el objetivo de esta investigación. La estructura de este método consiste en cuatro partes, primero, lograr identificar o caracterizar el problema, segundo, el planteamiento de la hipótesis explicado por una teoría de alcance general, tercero, se origina hipótesis derivadas producto de los acontecimientos observables de la hipótesis y, por último, se brinda una conclusión al comparar las hipótesis derivadas y general con los resultados (Marfull, 2019).

3.3. Enfoque de la investigación

El enfoque es cuantitativo, porque “utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías” (Hernández et al., 2014).

3.4. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo básica. Este tipo de investigación nos ayuda a comprender y generar conocimiento sin tener en cuenta que pueda o no ser aplicado (Dosne, 2007).

3.5. Nivel o alcance de investigación

El estudio realizado tiene un alcance explicativo. Mousalli-Kayat (2015), comenta que el nivel explicativo se caracteriza por la relación causa y efecto entre variables, y su propósito es conocer las razones (el por qué) reales. En este nivel de investigación se define la variable independiente como la causa y la variable dependiente como el efecto.

Sánchez (2019), expresa que este nivel de investigación realiza la prueba de hipótesis mediante pruebas o experimentos controlados en un laboratorio.

3.6. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es experimental o también llamado diseño de experimentos (DOE), pues el estudio tuvo dos grupos; el grupo de control y grupo experimental. Según Montgomery, D. C. (Ilzarbe et al., 2007) el diseño de experimentos se funda en realizar ensayos con la característica de producir modificaciones voluntarias en las variables, los factores que producen estas modificaciones deben ser controladas con el fin de indicar las causas de las variaciones.

3.7. Operacionalización de variables

Tabla 11.

Proceso para la medición de variables.

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores (medición)	Ítems (rango de variabilidad)	Escala de medición
X: Ceniza del bagazo de la cañaduz.	Según la RAE (2022), la ceniza es un “polvo de color gris claro que queda después de una combustión completa, y está formado, generalmente, por sales alcalinas y térreas, sílice y óxidos metálicos ”.	X1: Sílice X2: Óxidos metálicos	% Dióxido de silicio % Óxido de aluminio % Óxido de hierro	1. Clase N: SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ >= 70% 2. Clase F o C: SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ >= 50%	Nominal
Y1: Propiedades índices	Terzaghi y Peck (1978), indica que las propiedades índices de los suelos nos permiten diferenciar los tipos de suelo de una misma categoría, tales como: análisis granulométrico de los suelos, límites de consistencia , clasificación de suelos, entre otros.	Y1-1: Límites de consistencia	Índice de plasticidad	1. No plástico: IP = 0 2. Plasticidad baja: IP < 7 3. Plasticidad media: IP > 7; IP <= 20 4. Plasticidad alta: IP > 20	Ordinal

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores (medición)	Ítems (rango de variabilidad)	Escala de medición
		Y2-1: Compactación	Proctor modificado	1. Relación peso – volumen.	Racional
Y2: Propiedades mecánicas	Son cualidades del material relacionados con su capacidad de “resistir fuerzas o deformaciones” (Infinitia Industrial Consulting, 2022), tales como: compactación, resistencia de los suelos y otros.	Resistencia de los suelos	Relación de soporte california	<ol style="list-style-type: none"> 1. Subrasante inadecuada: CBR < 3% 2. Subrasante insuficiente: 3% <= CBR < 6% 3. Subrasante regular: 6% <= CBR < 10% 4. Subrasante buena: 10% <= CBR < 20% 5. Subrasante muy buena: 20% <= CBR < 30% 6. Subrasante excelente: CBR >= 30% 	Ordinal

Nota: Elaboración propia.

3.8. Población, muestra y muestreo

3.8.1. Población

La población de estudio es la progresiva 6+000 a 8+000 de la ruta Canua a Llinqui, ubicado en el distrito de Toraya, provincia de Aymaraes y departamento de Apurímac.

El tamaño de la población se obtuvo de la siguiente manera:

- Longitud de la vía (L): 2000 m.
- Ancho de la vía a nivel de subrasante (A): 4.10 m
- Altura de la subrasante (H): 0.60 m.
- Volumen de control (VC): 4920 m³.

$$VC = L * A * H$$

Según el Manual de Carreteras (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2013) el número de mediciones para límites de consistencia debe ser 1 cada 1000 m³ y para CBR 1 cada 2000 m³.

Por lo tanto, para un volumen control de 4920 m³ se obtiene 5 mediciones en el caso de límites de consistencia y 3 mediciones para CBR, tomando el mayor número de mediciones como tamaño de población.

3.8.2. Muestra

El tamaño de la muestra se calculó con el software EPIDAT 4.2, los datos necesarios para el cálculo fueron los siguientes:

- Tamaño de población: 5 mediciones.
- Nivel de confianza: 95%.
- Desviación estándar: 3.
- Precisión mínima: 1.
- Precisión máxima: 1.5.

Los resultados bajo los parámetros mencionados fueron:

- Para precisión mínima: 5 muestreos.
- Para precisión máxima: 4 muestreos.

Las cuatro muestras fueron seleccionadas por muestreo aleatorio según los procedimientos establecidos por el MTC en el Manual de Carreteras EG-2013.

3.8.3. Muestreo

El tipo de muestreo es probabilístico y la selección se realizó por muestreo aleatorio.

Los resultados de la ubicación de los puntos resultantes del muestreo se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 12.

Resultado de las progresivas y distancia para la extracción de especímenes.

Punto	Progresiva	Distancia del borde izquierdo
1	6 + 278	0.705 m
2	7 + 954	0.943 m
3	7 + 046	2.128 m
4	7 + 902	1.976 m

Nota. Elaboración propia.

3.9. Técnicas e instrumentos

3.9.1. Técnicas

La técnica empleada para la recolección de datos fue la observación de clasificación estructurada. Campos y Lule (2012) precisan la observación como una técnica lógica y sistemática para describir, analizar o explicar la “unidad de observación” y se realiza de acuerdo a “normas, reglas y procedimientos”. Los autores expresan que mediante la “observación estructurada” se extrae datos controlados que permitan su clasificación y sistematización.

Los procedimientos para llevar a cabo la observación estructurada se rigen bajo las normas estandarizadas detalladas en el Anexo 3.

3.9.2. Instrumentos

El instrumento empleado para el registro de datos se denomina guía de observación.

El instrumento mencionado, según Tamayo (como se citó en Campos y Lule, 2012), es “un formato”, en él se registra datos de manera sistemática.

Los formatos elaborados se establecieron según las normas mencionadas en el Anexo 3.

Los instrumentos de ingeniería (Canal Geotecnia Moderna, 2020) empleados fueron los equipos mencionados en cada norma, necesarios para la medición.

3.10. Procesamiento estadístico

Para la validación de la hipótesis se empleó el diseño de análisis de la varianza de medidas totalmente repetidas (ANOVA MR).

Se tomo este diseño ya que se realizó repetidas observaciones al mismo sujeto (suelo) bajo diferentes tratamientos (ceniza) (Pascual et al., 1996).

A continuación, se muestra el modelo del diseño de análisis de varianza de medidas repetidas.

Tabla 13.

Análisis de la varianza de medidas totalmente repetidas.

Variabilidad	SC	gl	CM	F calculado	Sig
Entre sujetos	SC_{entre}	$n - 1$	SC_{entre}/gl	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$p - value$
Dentro sujetos	SC_{dentro}	$n - 1$	SC_{dentro}/gl	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$p - value$

Variabilidad	SC	gl	CM	F calculado	Sig
Tiempo	SC_{tiempo}	$t - 1$	SC_{entre}/gl	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$p - value$
Error	SC_E	$(t-1)(n-1)$	SC_E/gl		

Nota. Donde SC es suma de cuadrados, gl son los grados de libertad y CM es el cuadrado medio. Adaptado de “*Tabla del análisis de la varianza para un modelo con un factor*” (p. 2), por S. Martínez, 2019.

Para obtener las expresiones de la Tabla 13, se tiene las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4. *Sumatoria de cuadrados, entre sujetos.*

$$SC_{entre} = \sum_{i=1}^n (y_{i1} - \bar{y}_1)^2 + \sum_{i=1}^n (y_{i2} - \bar{y}_2)^2 + \dots + \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2$$

Donde:

y_{in} = valor de la observación i.

\bar{y}_n = es la suma total de las N mediciones.

N = número total de observaciones en todos los tratamientos combinados.

n_i = número total de observaciones en cada tratamiento.

Ecuación 5. *Sumatoria de cuadrados, dentro de sujetos.*

$$SC_{dentro} = SC_T - SC_{TRAT}$$

Ecuación 6. *Suma de cuadrados tiempo.*

$$SC_{tiempo} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$$

Donde:

Y_{ij} = valor de la j ésima observación al i ésimo nivel del factor

Ecuación 7. *Suma de cuadrados del error.*

$$SC_{error} = \frac{SC_{TRAT}}{k - 1}$$

Donde:

k = número de tratamientos.

Previo a la prueba de la hipótesis por el diseño seleccionado se debe cumplir cuatro suposiciones. El primer supuesto es que las medidas sean independientes, segundo y tercero, que “las variables dependientes deben cumplir con los requisitos de normalidad y homocedasticidad”; cuarto, que exista esfericidad (Canal Psico Facil, 2022).

Se empleó el software SPSS Statistics para verificar es supuesto de normalidad (prueba de Shapiro – Wilk), homocedasticidad (prueba de Levene) y esfericidad (prueba de Mauchly). También se realizó el ANOVA MR, cabe indicar que en caso de que no se cumpla el supuesto de esfericidad, se toma el valor de significancia de Greenhouse-Geisser cuando el p-value de la prueba de esfericidad de Greenhouse-Geisser es menor a 0.75 caso contrario se considera el p-value de Huynh-Feldt.

Posterior al ANOVA MR se realizó las pruebas post hoc (palabra en latín que significa “después de esto”) de Bonferroni para identificar que grupos son diferentes, siempre y cuando se cumpla el supuesto de homocedasticidad.

Explicado el procedimiento, a continuación, se muestra los resultados del procesamiento de datos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Ensayos a la ceniza del bagazo de la cañaduz

La ceniza se obtuvo del trapiche Espinoza, se realizó el análisis granulométrico por tamizado y al observar los resultados se entiende que había granos desde 0.84 mm (tamiz N° 20), la ceniza que se empleó para añadir a los suelos fue aquellos que pasaron el tamiz N° 100 (0.15 mm).

Tabla 14.

Análisis granulométrico por tamizado de la ceniza del bagazo de la cañaduz.

Tamiz	Abertura (mm)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
N° 16	1.19	-	-	100.00%
N° 20	0.84	29.20%	29.20%	70.80%
N° 40	0.42	14.16%	43.36%	56.64%
N° 50	0.30	8.65%	52.01%	47.99%
N° 100	0.15	18.87%	70.87%	29.13%
N° 200	0.075	19.13%	90.00%	10.00%
<N° 200	FONDO	10.00%	100.00%	0.00%

Nota. Datos extraídos del análisis granulométrico por tamizado de la ceniza.

Tabla 15.*Análisis químico de la ceniza del bagazo de la cañaduz.*

Parámetro químico	Unidad	Resultados
SiO ₂	%	40.0
Fe ₂ O ₃	%	0.14
Al ₂ O ₃	%	3.10

Nota. Datos extraídos del análisis físico químico de ceniza.**4.1.2. Propiedades índice y mecánicas del suelo grupo control**

A continuación, en la Tabla 16 se presenta los resultados del análisis granulométrico (porcentaje que pasa) de las muestras extraídas de los puntos de muestreo de la Tabla 12, conforme lo establece la NTP de código 339.128.

Tabla 16.*Resultados de la gradación de los suelos por tamizado del grupo control.*

Tamiz	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa			
		M-1	M-2	M-3	M-4
1/2"	12.70	100.00%			100.00%
3/8"	9.53	97.85%			98.95%
1/4"	6.35	94.23%	100.00%	100.00%	98.07%
N° 4	4.76	89.24%	97.96%	98.68%	96.52%
N° 8	2.38	88.05%	96.85%	97.82%	95.05%
N° 10	2.00	86.85%	95.84%	96.47%	92.75%
N° 16	1.19	83.64%	94.60%	95.14%	91.74%
N° 20	0.84	81.75%	92.66%		88.64%
N° 30	0.59	80.50%	91.76%	93.17%	87.60%
N° 40	0.42	79.33%	90.58%	91.92%	86.62%
N° 50	0.30	78.35%	88.44%	90.83%	85.27%
N° 80	0.18	76.40%	86.02%	88.91%	83.25%
N° 100	0.15	75.11%	84.15%	88.23%	81.47%
N° 200	0.075	73.70%	83.33%	86.04%	80.59%
<N° 200	FONDO	0.01%	0.01%	0.03%	0.03%

Nota. Datos extraídos del ensayo análisis granulométrico por tamizado.

Las muestras 1, 2 y 4 clasifican dentro del grupo arcillas de baja plasticidad con presencia de arena, la muestra 3 como limo elástico según el sistema USCS.

De acuerdo a la clasificación AASHTO las muestras 1 y 4 se encuentran dentro del grupo A-7-6 de calidad aceptable a mala, la muestra 2 pertenece al grupo A-6 y la muestra 3 al grupo A-7-5, ambos de calidad aceptable a mala.

Tabla 17.

Resultados de la clasificación de los suelos del grupo control.

Muestra	Clasificación	
	USCS	AASHTO
M-1	CL	A-7-6 (10)
M-2	CL	A-6 (0)
M-3	MH	A-7-5 (43)
M-4	CL	A-7-6 (10)

Nota. Datos extraídos de los instrumentos adjuntos en el Anexo 10.

En la Tabla 18 se plasma los datos resultantes de los ensayos de L. L., L. P., I. P., máxima densidad seca y CBR de las muestras M-1, M-2, M-3 y M-4 (grupo control).

De los resultados del I. P. y teniendo en cuenta su clasificación según el Manual de carreteras sección suelos, geotecnia y pavimentos (MTC, 2014) se señala que la muestra M-1, M-2 y M-4 son de plasticidad media característico de suelos arcillosos, la muestra M-3 es de alta plasticidad característico de suelos muy arcillosos.

Tabla 18.

Resultados del límite de consistencia, MDS y CBR del grupo control.

Muestra	L. L.	L. P.	I. P.	MDS	CBR
M-1	44.03%	28.03%	15.99%	1.787	3.28%

Muestra	L. L.	L. P.	I. P.	MDS	CBR
M-2	38.05%	27.54%	10.51%	1.812	15.18%
M-3	53.12%	30.17%	22.95%	1.817	7.14%
M-4	43.09%	27.52%	15.57%	1.844	7.71%

Nota. Datos extraídos de los instrumentos adjuntos en el Anexo 10.

4.1.3. Límite líquido del grupo control y muestral

Tabla 19.

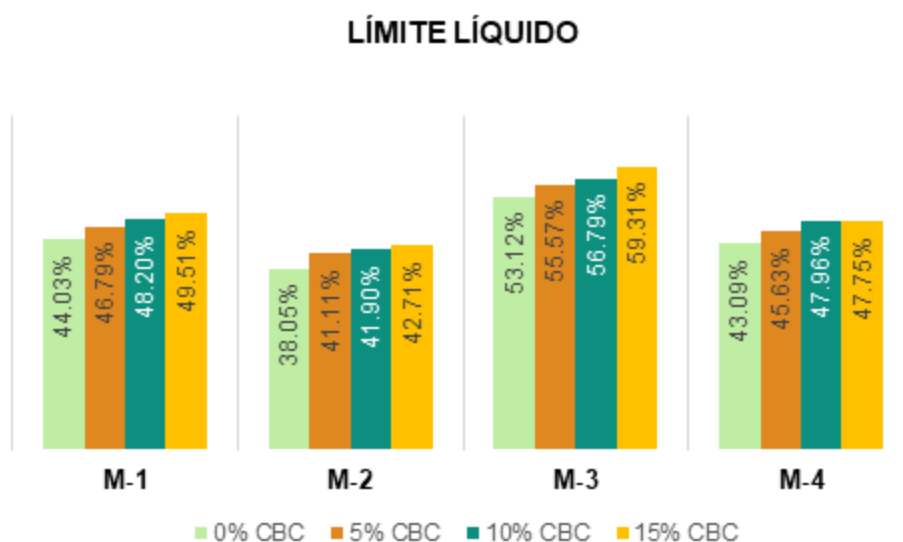
Resultados del ensayo para determinar el L. L. de los suelos.

Muestra	0%	5%	10%	15%
M-1	44.03%	46.79%	48.20%	49.51%
M-2	38.05%	41.11%	41.90%	42.71%
M-3	53.12%	55.57%	56.79%	59.31%
M-4	43.09%	45.63%	47.96%	47.75%

Nota. Datos extraídos de los instrumentos adjuntos en el Anexo 10.

Figura 5.

Resultados del ensayo para determinar el L. L. de los suelos.



Nota. Interpretación: En el grafico se observa que mientras mayor es la presencia de la CBC en el suelo el L. L. del suelo va incrementado.

4.1.4. Límite plástico del grupo control y muestral

Tabla 20.

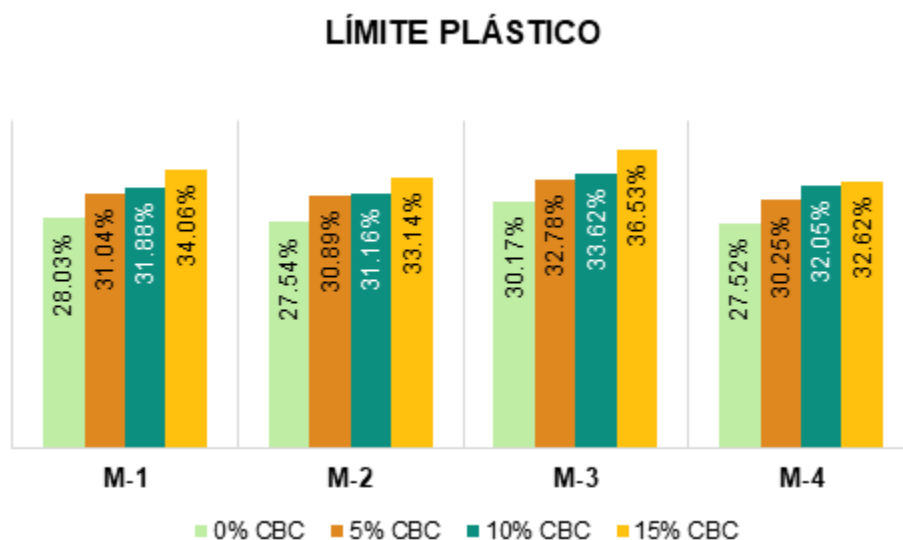
Resultados del ensayo para determinar el L. P. de los suelos.

Muestra	0%	5%	10%	15%
M-1	28.03%	31.04%	31.88%	34.06%
M-2	27.54%	30.89%	31.16%	33.14%
M-3	30.17%	32.78%	33.62%	36.53%
M-4	27.52%	30.25%	32.05%	32.62%

Nota. Datos extraídos de los instrumentos adjuntos en el Anexo 10.

Figura 6.

Resultados del ensayo para determinar el L. P. de los suelos.



Nota. Interpretación: En el grafico se observa que mientras mayor es la presencia de la CBC en el suelo el L. P. del suelo va incrementado.

4.1.5. Índice de plasticidad del grupo control y muestral

Tabla 21.

Resultados del I. P. de los suelos.

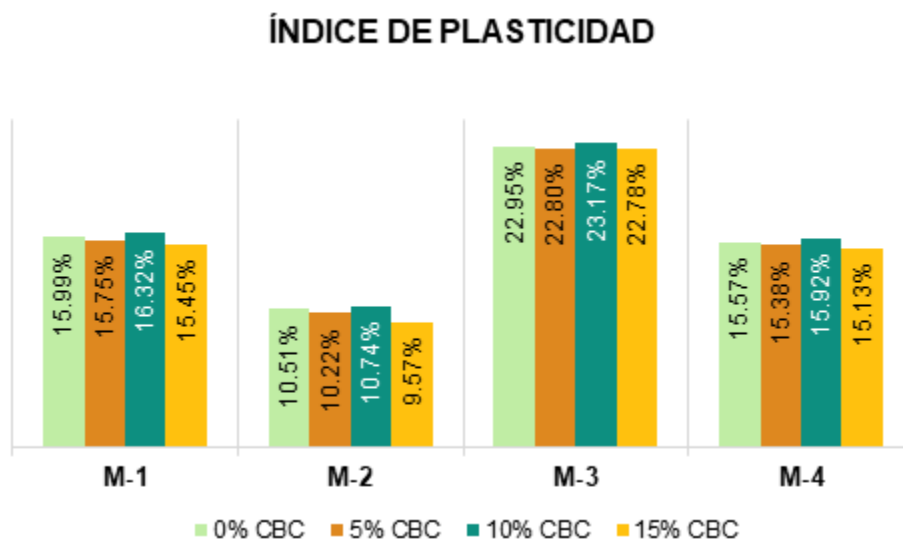
Muestra	0%	5%	10%	15%
M-1	15.99%	15.75%	16.32%	15.45%
M-2	10.51%	10.22%	10.74%	9.57%
M-3	22.95%	22.80%	23.17%	22.78%

Muestra	0%	5%	10%	15%
M-4	15.57%	15.38%	15.92%	15.13%

Nota. Datos extraídos de los instrumentos adjuntos en el Anexo 10.

Figura 7.

Resultados del I. P. de los suelos.



Nota. Interpretación: En el gráfico se visualiza que la ceniza del bagazo de la cañaduz incrementa el IP al añadir 10% de CBC y disminuya al añadir 5% y 15% de CBC.

4.1.6. Máxima densidad seca del grupo control y muestral

Luego de haber realizado el ensayo proctor modificado según el procedimiento A se obtuvo los siguientes datos:

Tabla 22.

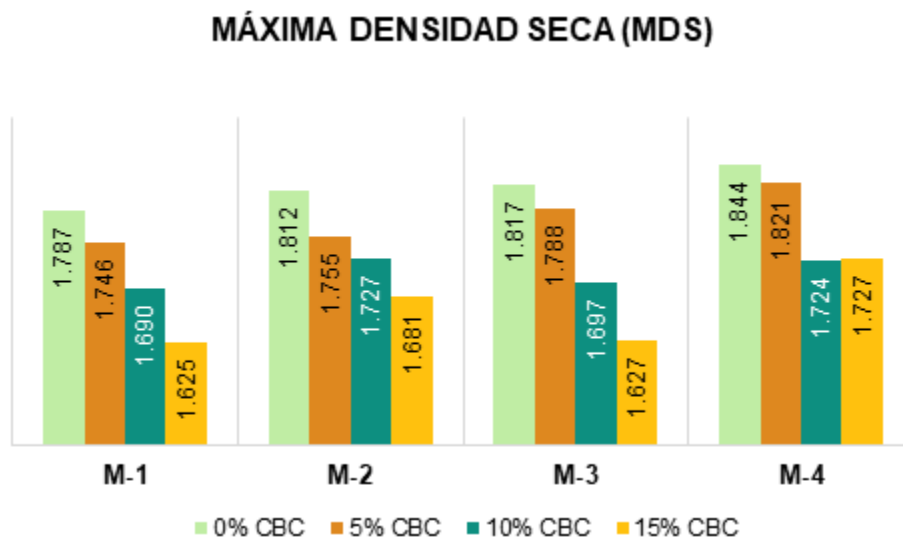
Resultados de la MDS de los suelos en g/cm³.

Muestra	0%	5%	10%	15%
M-1	1.787	1.746	1.690	1.625
M-2	1.812	1.755	1.727	1.681
M-3	1.817	1.788	1.697	1.627
M-4	1.844	1.821	1.724	1.727

Nota. Datos extraídos de los instrumentos adjuntos en el Anexo 10.

Figura 8.

Resultados de la MDS de los suelos en g/cm³.



Nota. Interpretación: Del gráfico se interpreta que el aumento de la ceniza del bagazo de la cañaduz provoca la reducción del peso unitario en condición seco.

4.1.7. CBR de suelos (laboratorio) del grupo control y muestral

Tabla 23.

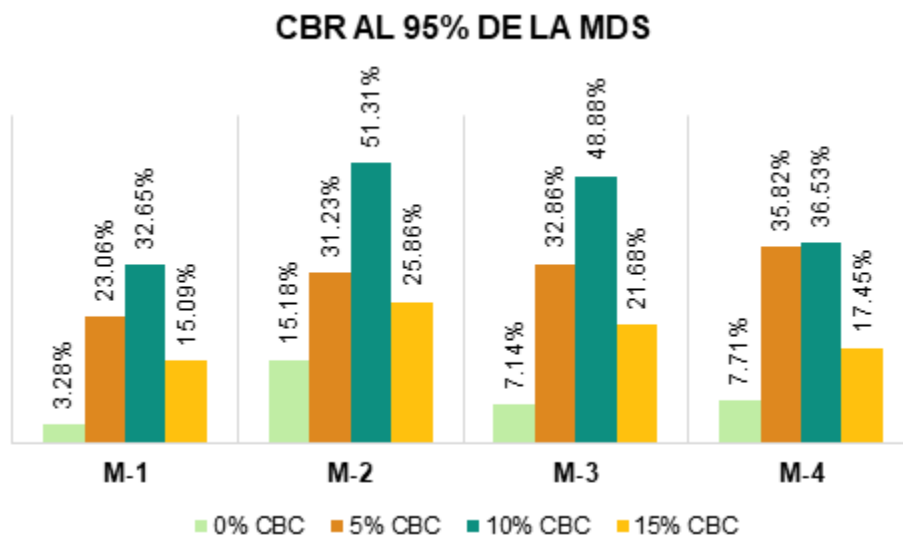
Resultados del valor CBR de suelos al 95% de la MDS, correspondiente a 0.1”.

Muestra	0%	5%	10%	15%
M-1	3.28%	23.06%	32.65%	15.09%
M-2	15.18%	31.23%	51.31%	25.86%
M-3	7.14%	32.86%	48.88%	21.68%
M-4	7.71%	35.82%	36.53%	17.45%

Nota. Datos extraídos de los instrumentos adjuntos en el Anexo 10.

Figura 9.

Resultados del CBR de suelos al 95% de la MDS, correspondiente a 0.1”.



Nota. Interpretación: Del gráfico se interpreta que todas las pruebas experimentales alcanzaron valores de CBR mayores que el grupo control, los valores más altos suceden cuando se añade 10% de CBC al suelo.

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Objetivo específico 1

Con el objetivo de determinar la influencia de la adición de ceniza del bagazo de la cañaduz sobre el índice de plasticidad de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui, mediante la observación se aprecia que el I. P. reduce cuando añadimos 5% y 15% de CBC y aumenta con un 10% de CBC (ver Figura 7), y se pudo encontrar que el p-value (<0.001) resultó menor que el nivel de significancia (alfa = 0.05) según el ANOVA MR, y en la prueba de Bonferroni el p-value entre los suelos con 0% de CBC y los suelos con 5%, 10% y 15% de CBC resultaron en 0.034, 0.021 y 0.28 respectivamente, esto nos demuestra que la diferencia del índice de plasticidad en comparación de los suelos sin ceniza y los suelos con 5% y 10% de CBC son significativos; ocasionando un reducción cuando añadimos 5% de CBC y un incremento luego de adicionar 10% de CBC, en ese sentido se rechaza

la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación 1. La reducción del I. P. cuando se adiciona del 5% y 15% de CBC se observa en las investigaciones de Niken Silmi et al. (2017), Aquino (2020) y Salas (2022), en la investigación de Hidalgo et al. (2020) el I. P. se reduce cuando se añade 15% de ceniza; por otra parte, en nuestro caso se observa el aumento del IP cuando añadimos 10% de CBC.

4.2.2. Objetivo específico 2

Al determinar la influencia de la adición de ceniza del bagazo de cañaduz sobre la máxima densidad seca de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui, resultó que el p-value de la prueba de Bonferroni dio un valor de 0.092 entre las comparaciones de 0% y 5% de CBC, 0.007 entre 0% y 10% de CBC y 0.016 entre 0% y 15% de CBC, de los resultados mencionados podemos decir que la máxima densidad seca de los suelos al añadir 10% y 15% de CBC son diferentes significativamente a los suelos con 0% de CBC; y a medida que la adición de ceniza es mayor la máxima densidad seca presenta una reducción significativa como se muestra en la Figura 8, por consiguiente se rechaza la hipótesis nula y se admite la hipótesis específica 2. Los antecedentes de investigación que ratifican los resultados del presente son de los autores Portilla y Andaluz (2022), Athira y Sini (2019), Ccanto (2019), pero los demás estudios mencionados en los antecedentes presentan resultados contrarios, es decir, que la máxima densidad seca va en aumento cuando el porcentaje de ceniza aumenta; en el caso de Ojeda-Farías et al. (2018) y Hidalgo et al. (2020) presentan un valor máximo en la primera adición (3% y 5% respectivamente) y luego desciende.

4.2.3. Objetivo específico 3

De igual modo al determinar la influencia de la adición de ceniza del bagazo de cañaduz sobre la relación de soporte de california de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui, el valor de significancia (<0.001) resultó menor que el nivel de significancia (alfa = 0.05) mediante el ANOVA MR, y a través de la prueba de Bonferroni se comprueba que al añadir 5%, 10% y 15% de CBC ($p=0.023$, $p=0.009$ y $p=0.009$ respectivamente) se produce un cambio significativo en comparación a los suelos con 0% de CBC, esto quiere decir que las adiciones planteadas influyen en las relaciones de soporte de california, frente a lo mencionado se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa 3. Como vemos en la Figura 9 se aprecia que los valores del CBR ascienden hasta un punto máximo (10% de CBC) y luego desciende, pero sigue siendo un valor mayor al del suelo sin adición; este comportamiento se presenta en los estudios realizados por Athira y Sini (2019), Ojeda-Farías et al. (2018) e Hidalgo et al. (2020) cuyos valores máximos se obtuvieron al añadir 3%, 5% y 10% respectivamente.

4.3. Prueba de hipótesis

4.3.1. Prueba de hipótesis específica 1

1. Prueba de normalidad.

Se verificó con la prueba Shapiro – Wilk, puesto que, las observaciones son menor a 50. Las hipótesis son:

Hipótesis nula (H_0): Las variables siguen una distribución normal.

Hipótesis alternativa (H_1): Las variables no siguen una distribución normal.

Tabla 24.

Resultados del análisis de normalidad con Shapiro – Wilk del I. P.

Variable	% de adición de CBC	Shapiro – Wilk		
		Estadístico	gl	Sig
	0	0.948	4	0.704
Índice de plasticidad	5	0.947	4	0.695
	10	0.950	4	0.715
	15	0.947	4	0.696

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Puesto que el “valor de significación, o valor p” (IBM Corporation, 2023) es superior al “nivel de significación” (alfa) (IBM Corporation, 2023), que en nuestro caso es 0.05, no se puede rechazar la H0, asumiendo que las variables siguen una distribución normal.

2. Prueba de homocedasticidad.

Se verificó con la prueba de Levene, y las hipótesis son:

Hipótesis nula (H0): Todas las varianzas son iguales.

Hipótesis alternativa (H1): Al menos una de las varianzas es diferente de la otra.

Tabla 25.

Resultados del análisis de homocedasticidad con Levene del I. P.

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
0.003	3	12	1.000

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Observamos que el valor de significación es mayor que el nivel de significación (alfa = 0.05), por consiguiente, no se puede rechazar la hipótesis nula, asumiendo que las variables tienen varianzas iguales.

3. Prueba de esfericidad de Mauchly.

Las hipótesis son:

Hipótesis nula (H0): Se cumple la esfericidad.

Hipótesis alternativa (H1): No se cumple la esfericidad.

Tabla 26.

Resultados del análisis de esfericidad del I. P.

Efecto intra-sujetos	gl	Sig
Índice de plasticidad	5	0.079

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Dado que el p-value es mayor a 0.05 no se puede rechazar la hipótesis nula, cumpliendo el supuesto de esfericidad.

4. Estadísticos descriptivos.

Se presenta la media y las desviaciones estándar de las observaciones del índice de plasticidad.

Tabla 27.

Media y desviaciones estándar (DE) del I. P.

% de adición de CBC	Media	DE
0%	16.2550	5.11102
5%	16.0375	5.16687
10%	16.5375	5.09999
15%	15.7325	5.41869

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

5. Prueba ANOVA MR.

Dado que se cumple los cuatro supuestos se procedió a realizar el diseño ANOVA MR.

Hipótesis nula (H0): La adición de ceniza del bagazo de la cañaduz no influye sobre el índice de plasticidad de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui.

Hipótesis alternativa (H1): La adición de ceniza del bagazo de la cañaduz influye sobre el índice de plasticidad de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui.

Tabla 28.*ANOVA MR del I. P.*

Variabilidad	gl	F	Sig	Tamaño del efecto (eta parcial al cuadrado)	Potencia observada ($\beta-1$)
Dentro sujetos	3	19.250	<.001	0.865	1.000
Error	9				

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Del análisis estadístico decimos que hay diferencias significativas entre las medidas del índice de plasticidad de los cuatro porcentajes de CBC con un tamaño de efecto elevado $F_{(3)} = 19.25$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.865$, $\beta-1 = 1$, como el valor p es menor al valor alfa se rechaza la hipótesis nula y con un 95% de confianza podemos asegurar que la CBC produce cambios en el I. P.

6. Prueba de Bonferroni.

Al aceptar la hipótesis alternativa en el ANOVA MR, procedimos a realizar la prueba de Bonferroni.

Tabla 29.*Resultados del análisis de Bonferroni del I. P.*

Dosificación (i)	Dosificación (j)	DM (i-j)	Error típico	Sig.	IC inferior	IC superior
0%	5%	0.218*	0.030	0.034	0.028	0.407
	10%	-0.282*	0.034	0.021	-0.491	-0.074
	15%	0.523	0.160	0.280	-0.472	1.517
5%	0%	-0.218*	0.030	0.034	-0.407	-0.028
	10%	-0.500*	0.045	0.009	-0.778	-0.222
	15%	0.305	0.130	0.606	-0.506	1.116
10%	0%	0.282*	0.034	0.021	0.074	0.491
	5%	0.500*	0.045	0.009	0.222	0.778
	15%	0.805	0.161	0.092	-0.196	1.806
15%	0%	-0.523	0.160	0.280	-1.517	0.472

Dosificación (i)	Dosificación (j)	DM (i-j)	Error típico	Sig.	IC inferior	IC superior
	5%	-0.305	0.130	0.606	-1.116	0.506
	10%	-0.805	0.161	0.092	-1.806	0.196

Nota. Donde DM es diferencia de medias. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Luego de haber realizado la comparación por pares se pudo señalar que los índices de plasticidad al añadir 5% de CBC (M=16.0375, DE=5.16687, $p=0.034$ [IC 95% 0.028, 0.407]) fueron menores a los resultados de los suelos sin adición (M=16.255, DE=5.11102). Por otra parte, los índices de plasticidad al añadir 10% de CBC (M=16.5375, DE=5.09999, $p=0.021$ [IC 95% -0.491, -0.074]) fueron mayores a los índices de plasticidad de los suelos sin adición.

4.3.2. Prueba de hipótesis específica 2

1. Prueba de normalidad.

Se verificó con la prueba de Shapiro – Wilk. Las hipótesis son:

H0: Las variables siguen una distribución normal.

H1: Las variables no siguen una distribución normal.

Tabla 30.

Resultados del análisis de normalidad con Shapiro – Wilk de la MDS.

Variable	% de adición de CBC	Shapiro – Wilk		
		Estadístico	gl	Sig
	0	0.977	4	0.885
Máxima densidad seca	5	0.929	4	0.589
	10	0.850	4	0.227
	15	0.875	4	0.320

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

En los grupos se da que el valor p es mayor que el nivel de significación (alfa = 0.05), por consiguiente, no se puede rechazar la hipótesis nula (H0), asumiendo que las variables siguen una distribución normal.

2. Prueba de homocedasticidad.

Se verificó con la prueba de Levene, y las hipótesis son:

Hipótesis nula (H0): Todas las varianzas son iguales.

Hipótesis alternativa (H1): Al menos una de las varianzas es diferente de la otra.

Tabla 31.

Resultados del análisis de homocedasticidad con Levene de la MDS.

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2.516	3	12	0.108

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

El valor de significación resultó mayor que el nivel de significación (alfa = 0.05), por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula, asumiendo que las variables tienen varianzas iguales.

3. Prueba de esfericidad de Mauchly.

Las hipótesis son:

Hipótesis nula (H0): Se cumple la esfericidad.

Hipótesis alternativa (H1): No se cumple la esfericidad.

Tabla 32.

Resultados del análisis de esfericidad de la MDS.

Efecto intra-sujetos	gl	Sig
Máxima densidad seca	5	0.220

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Dado que el valor de significancia es mayor a 0.05 no se puede rechazar la hipótesis nula, entonces se cumple el cuarto supuesto.

4. Estadísticos descriptivos.

Se presenta la media y las desviaciones estándar de las observaciones de la máxima densidad.

Tabla 33.

Media y desviaciones estándar (DE) de la MDS.

% de adición de CBC	Media	DE
0%	1.8150	0.02337
5%	1.7775	0.03416
10%	1.7095	0.01873
15%	1.6650	0.04880

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

5. Prueba ANOVA.

Verificado las suposiciones, se realizó el diseño ANOVA MR.

Hipótesis nula (H0): La adición de ceniza del bagazo de la cañaduz no influye sobre la máxima densidad seca de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui.

Hipótesis alternativa (H2): La adición de ceniza del bagazo de la cañaduz influye sobre la máxima densidad seca de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui.

Tabla 34.

ANOVA MR de la MDS.

Variabilidad	gl	F	Sig	Tamaño del efecto (eta parcial al cuadrado)	Potencia observada (β-1)
Dentro sujetos	3	42.107	<.001	0.933	1
Error	9				

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Se encontró diferencias significativas entre las medidas de la máxima densidad de los cuatro tratamientos con un tamaño de efecto elevado $F_{(3)} = 42.107$,

$p < 0.001$, $\eta^2 = 0.933$, $\beta - 1 = 1$, lo que nos lleva a rechazar la hipótesis nula y se puede decir que la CBC influye en la MDS con un 95% de confianza.

6. Prueba de Bonferroni.

Dado que la CBC influye en la MDS, es necesario indicar que tratamiento es el que produce la variación.

Tabla 35.

Resultados del análisis de Bonferroni de la MDS.

Dosificación (i)	Dosificación (j)	DM (i-j)	Error típico	Sig.	IC inferior	IC superior
0%	5%	0.038	0.008	0.092	-0.009	0.084
	10%	0.106*	0.009	0.007	0.051	0.160
	15%	0.150*	0.016	0.016	0.048	0.252
5%	0%	-0.038	0.008	0.092	-0.084	0.009
	10%	0.068	0.016	0.146	-0.032	0.168
	15%	0.112	0.019	0.056	-0.005	0.230
10%	0%	-0.106*	0.009	0.007	-0.160	-0.051
	5%	-0.068	0.016	0.146	-0.168	0.032
	15%	0.044	0.017	0.453	-0.059	0.148
15%	0%	-0.150*	0.016	0.016	-0.252	-0.048
	5%	-0.112	0.019	0.056	-0.230	0.005
	10%	-0.044	0.017	0.453	-0.148	0.059

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Las diferencias significativas se dieron en las máximas densidades al adicionar 10% y 15% de CBC, con respecto a las máximas densidades de los sujetos sin adición, en donde las máximas densidades de los suelos con 0% de CBC ($M=1.815$, $DE=0.02337$) fueron mayores a las máximas densidades de los suelos con 10% de CBC ($M=1.7095$, $DE=0.01873$, $p=0.007$ [IC 95% 0.051, 0.160]) y a las máximas densidades de los suelos con 15% de CBC ($M=1.665$, $DE=0.0488$, $p=0.016$ [IC 95% 0.048, 0.252]).

4.3.3. Prueba de hipótesis específica 3

1. Prueba de normalidad.

Se empleo la prueba de Shapiro – Wilk. Las hipótesis son:

H0: Las variables siguen una distribución normal.

H1: Las variables no siguen una distribución normal.

Tabla 36.

Resultados del análisis de normalidad con Shapiro – Wilk del CBR.

Variable	% de adición de CBC	Shapiro – Wilk		
		Estadístico	gl	Sig
	0	0.922	4	0.549
Máxima densidad seca	5	0.913	4	0.498
	10	0.882	4	0.349
	15	0.969	4	0.838

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

En los cuatro sujetos se da que el valor de significación es mayor que el nivel de significación ($\alpha = 0.05$), en consecuencia, se cumple el supuesto de que las variables tienen una distribución normal.

2. Prueba de homocedasticidad.

Este supuesto se verificó con la prueba de Levene, y las hipótesis son:

Hipótesis nula (H0): Todas las varianzas son iguales.

Hipótesis alternativa (H1): Al menos una de las varianzas es diferente de la otra.

Tabla 37.

Resultados del análisis de homocedasticidad con Levene del CBR.

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2.523	3	12	0.107

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Como el valor de significación no es menor que el nivel de significación (alfa = 0.05), entonces, no se puede rechazar la hipótesis nula, por lo que se asume que las variables poseen varianzas iguales.

3. Prueba de esfericidad de Mauchly.

Las hipótesis son:

Hipótesis nula (H0): Se cumple la esfericidad.

Hipótesis alternativa (H1): No se cumple la esfericidad.

Tabla 38.

Resultados del análisis de esfericidad del CBR.

Efecto intra-sujetos	gl	Sig
CBR	5	0.619

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Dado que el valor de significancia es mayor a 0.05 no se puede rechazar la hipótesis nula.

4. Estadísticos descriptivos.

Se presenta la media y las desviaciones estándar de las observaciones de la máxima densidad.

Tabla 39.

Media y desviaciones estándar (DE) del CBR.

% de adición de CBC	Media	DE
0%	8.3275	4.97412
5%	30.7425	5.46270
10%	42.3425	9.14485
15%	20.0200	4.75293

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

5. Prueba ANOVA MR.

Al comprobar que se cumple los supuestos, se realizó el ANOVA MR.

Hipótesis nula (H0): La adición de ceniza del bagazo de la cañaduz no influye sobre la relación de soporte califonia de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui.

Hipótesis alternativa (H3): La adición de ceniza del bagazo de la cañaduz influye sobre la relación de soporte califonia de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui.

Tabla 40.

ANOVA MR del CBR.

Variabilidad	gl	F	Sig	Tamaño del efecto (eta parcial al cuadrado)	Potencia observada ($\beta-1$)
Dentro sujetos	3	51.546	<.001	0.945	1.000
Error	9				

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

Hubo diferencias significativas entre las medidas de la relación de soporte de califonia, con un tamaño de efecto grande $F_{(3)} = 51.546$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.945$, $\beta-1 = 1$. Se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa.

6. Prueba de Bonferroni.

Después de aceptar la hipótesis alternativa con el ANOVA MR, debemos indicar que tratamiento es el que tiene una variación significativa.

Tabla 41.

Resultados del análisis de Bonferroni del CBR.

Dosificación (i)	Dosificación (j)	DM (i-j)	Error típico	Sig.	IC inferior	IC superior
0%	5%	-22.415*	2.751	0.023	-39.558	-5.272
	10%	-34.015*	3.065	0.009	-53.113	-14.917
	15%	-11.692*	1.039	0.009	-18.168	-5.217
5%	0%	22.415*	2.751	0.023	5.272	39.558
	10%	-11.600	4.224	0.426	-37.92	14.72

Dosificación (i)	Dosificación (j)	DM (i-j)	Error típico	Sig.	IC inferior	IC superior
	15%	10.723	2.812	0.190	-6.803	28.248
10%	0%	34.015*	3.065	0.009	14.917	53.113
	5%	11.600	4.224	0.426	-14.72	37.92
	15%	22.323*	2.359	0.015	7.624	37.021
15%	0%	11.692*	1.039	0.009	5.217	18.168
	5%	-10.722	2.812	0.190	-28.248	6.803
	10%	-22.322*	2.359	0.015	-37.021	-7.624

Nota. Datos tomados del software IBM SPSS Statistic. Copyright 2023 por IBM.

De los resultados de la prueba de Bonferroni se pudo ver que las relaciones de soporte de californina de los suelos con 0% de CBC (M=8.3275, DE=4.97412) fueron menores a las relaciones de soporte de californina de los suelos con 5% de CBC (M=30.7425, DE=5.4627, p=0.023 [IC 95% -39.558, -5.272]), a las relaciones de soporte de californina de los suelos con 10% de CBC (M=42.3425, DE=9.14485, p=0.009 [IC 95% -53.113, -14.917]) y a las relaciones de soporte californina de los suelos con 15% de CBC (M=20.02, DE=4.75293, p=0.009 [IC 95% -18.168, -5.217]). La mayor diferencia con respecto a los sujetos con 0% de CBC fue con los suelos con 10% de CBC, seguido de los suelos con 5% de CBC y finalmente con los suelos con 15% de CBC.

4.3.4. Prueba de hipótesis general

En el capítulo 3: Metodología de la investigación, se especificó que el método empleado fue el hipotético – deductivo, en donde las hipótesis específicas derivan de la hipótesis general, por tanto, una vez contrastado las hipótesis específicas 1, 2 y 3 con las hipótesis generales podremos deducir si se acepta o rechaza la hipótesis planteada.

1. Comprobación de la hipótesis general.

En la prueba de hipótesis específica 1 se rechazó la hipótesis nula.

En la prueba de hipótesis específica 2 se rechazó la hipótesis nula.

En la prueba de hipótesis específica 3 se rechazó la hipótesis nula.

Como se rechaza la hipótesis nula en los tres casos, entonces se rechaza la hipótesis nula de la hipótesis general.

2. Deducción de hipótesis general.

Seguido de la comprobación, podemos deducir lo siguiente: la adición de ceniza del bagazo de la cañaduz influye sobre las propiedades índices y mecánicas de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui – Aymaraes – Apurímac, 2019.

CONCLUSIONES

1. En esta tesis se determinó la influencia de la adición de ceniza del bagazo de cañaduz sobre las propiedades índice y mecánicas de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui, y pesar de que se obtuvo resultados óptimos en la relación de soporte de california, no se puede emplear el suelo tratado con ceniza para subrasante en el caso de rellenos porque el índice de plasticidad no satisface el requisitos de calidad que indica el manual de especificaciones técnicas generales para construcción, que debe ser menor al 10% en la corona.

2. Para los tres objetivos específicos se empleó el método de ANOVA MR en conjunto con la prueba de Bonferroni, con ello se determinó la influencia de la adición de ceniza del bagazo de cañaduz sobre el índice de plasticidad de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui, con añadir 5% y 10% de CBC en relación a la masa del suelo seco se produce una variación significativa en el índice de plasticidad en comparación con los suelos sin CBC. El índice de plasticidad en las muestras sin CBC alcanzó valores de 15.99%, 10.51%, 22.95% y 15.57% y al añadir 5% de CBC los valores del índice de plasticidad se redujeron a 15.75%, 10.22%, 22.80% y 15.38% respectivamente, y con 10% de CBC aumentan a 16.32%, 10.74%, 23.17% y 15.92%.

3. De igual forma se determinó la influencia de la adición de ceniza del bagazo de cañaduz sobre la máxima densidad seca de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui. La máxima densidad seca disminuye a medida que aumenta la adición de ceniza, y el menor valor se da cuando se añade 15% de CBC en las cuatro muestras, en la muestra M-1 disminuyó de 1.787 g/cm³ a 1.625 g/cm³, la muestra M-2 de 1.812 g/cm³ a 1.681 g/cm³, la muestra M-3 de 1.817 g/cm³ a 1.627 g/cm³ y la muestra M-4 de 1.844 g/cm³ a 1.727 g/cm³.

4. Por último, también se determinó la influencia de la adición de ceniza del bagazo de cañaduz sobre la relación de soporte de california de un suelo de subrasante en la ruta Canua a Llinqui. Los efectos de la adición de la ceniza sobre la relación de soporte de california es que produce aumentos significativos; donde la diferencia de medias de los CBR entre los suelos con 0% y 10% de CBC (DM=-34.015) es mayor que los suelos con 5% (DM=-22.415) y 15% de CBC (DM=-11.692), esto quiere decir que es la adición (10% de CBC) que mejores valores de CBR resultaron. Los valores CBR de las cuatro muestras del suelo sin tratamiento son de 3.28%, 15.18%, 7.14% y 7.71% y luego de añadir 10% de CBC alcanzaron valores CBR al 95% de la MDS de 32.65%, 51.31%, 48.88% y 36.53% respectivamente; pero sólo dos muestras (M-2 y M-3) lograron valores superiores al 40% que es el valor mínimo que deben poseer los suelos que conforman una subrasante a nivel de relleno.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones relacionados a la presente investigación se recomienda realizar ensayos físico-químicos al suelo para un mejor entendimiento de las reacciones químicas entre suelo y ceniza.

En vista de las diversas investigaciones que resultaron en mejoras significativas se recomienda si está dentro de sus alcances económicos realizar tramos de prueba empleando la ceniza y determinar si en cuanto beneficio-costos puede ser mejor que las alternativas que se tiene hasta la actualidad.

BIBLIOGRAFÍA

- ABC Geotechnical Consulting. (2024). *Humedad Óptima*.
<https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/glosario/humedad-optima/>
- Airbus. (2021). *Coordenadas geográficas*. Google Earth.
- Aquino Mendoza, M. A. (2018). *Bases teóricas para la estabilización de suelos con ceniza de bagazo de caña de azúcar para su uso en subrasantes en el distrito de Laredo - Trujillo, La Libertad 2018* [Tesis de Pregrado, Universidad Privada de Trujillo].
<http://repositorio.uprit.edu.pe/handle/UPRIT/93>
- Athira, T., & Sini, T. (2019). Effect of Bagasse Ash on Strength Characteristics and Index Properties of Kaolinite Clay. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(6), 1273–1275.
<https://www.ijert.org/research/effect-of-bagasse-ash-on-strength-characteristics-and-index-properties-of-kaolinite-clay-IJERTV8IS060698.pdf>
- Barragán Garzón, C. A., & Cuervo Camacho, H. A. (2019). *Análisis del comportamiento físico mecánico de la adición de ceniza de cascarilla de arroz de la variedad blanco a un suelo areno- arcilloso* (Vol. 561, Número 3) [Tesis de Pregrado, Universidad Piloto de Colombia Sección Alto Magdalena]. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6488>
- Campos y Covarrubias, G., & Lule Martínez, N. E. (2012). La observación, un método para el estudio de la realidad. *Revista Xihmai*, VII(13), 45–60.
- Canal Geotecnia Moderna. (2020, junio 3). *Métodos y Herramientas de Recolección de Datos en Ingeniería Civil* [Archivo de video]. Youtube.

https://www.youtube.com/watch?v=n_IPC8L_Qyc&ab_channel=GeotecniaModerna

Canal Psico Facil. (2022, agosto 4). *ANOVA de medidas repetidas SPSS*

[Archivo de vídeo]. Youtube.

https://www.youtube.com/watch?v=uSxBycCG-GE&t=435s&ab_channel=PsicoFacil

Carbajal Cespedes, M. (2022). *Estabilización de la subrasante adicionando cenizas de madera en la Vía de evitamiento, distrito de Abancay, Apurímac - 2022* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo].

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/92670>

Castillo Parra, B. F. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos de Macas con valores de CBR menores al 5% y límites líquidos superiores al 100%, para utilizarlos como subrasantes en carreteras* [Tesis de Postgrado, Universidad de Cuenca].

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26917>

Castillo Velarde, R. C. (2022). *Uso de ceniza de bagazo de caña de azúcar para la estabilización de base en la carretera Santiago de Cao – Huanchaco, 2021* [Tesis de Postgrado, Universidad Ricardo Palma].

<https://hdl.handle.net/20.500.14138/5564>

Ccanto Diaz, A. (2019a). *Estabilización de suelo arcilloso con cenizas de Bagacillo (CB) para el mejoramiento de la sub rasante de la Av. Universitaria, Lima 2019* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo].

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/47343>

Ccanto Diaz, A. (2019b). *Estabilización de suelo arcilloso con cenizas de Bagacillo (CB) para el mejoramiento de la sub rasante de la Av.*

Universitaria, Lima 2019 [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo].

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/47343>

Chacón, J., Hamdouni, R. El, Lamas, F., & Irigaray, C. (2004). *Mecánica de suelos y rocas: Práctica y Ensayos* (Primera edición). Departamento de Ingeniería civil Universidad de Granada.

https://www.researchgate.net/publication/258857638_MECANICA_DE_SUELOS_Y_ROCAS_Practicas_y_Ensayos

Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (Quinta edición). Editorial LIMUSA.

Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (S. R. Cervantes Gonzáles, Ed.; Cuarta edición). Cengage Learning Editores.

de Lima, R. P., de Avila Jacintho, A. E. P. G., Forti, N. C. da S., & Pimentel, L.

L. (2022). Estabilização de solo laterítico utilizando cinza do bagaço da cana de açúcar e cal hidratada. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 27(1), e13143.

<https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1343>

Enciso Ortiz, C. (2022). *Adición de ceniza de eucalipto para mejorar la estabilidad de la subrasante en la carretera Abancay -Huayllabamba, Apurímac, 2022* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo].

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/91902>

Especificación estándar para ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón (2020).

<https://pdfcoffee.com/astm-c618-19-spanish-3-pdf-free.html>

Galvez Reyes, P. M. del R., & Santoyo Villegas, J. K. (2019). *Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo* [Tesis de Pregrado,

Universidad Nacional de Jaén].

<http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/232>

GEOCON Servicios de Ingeniería S.A.C. (2016). *Suelos*.

<http://www.geoconsi.com/suelos/>

Geotecnia Moderna. (2020, abril 21). *Liquid Limit - Límite Líquido - Caolinita - Casagrande - Arbulu*. Youtube.

<https://www.youtube.com/watch?v=QBQI7EGmOBs>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación 6ta edición (Sexta edición)*.

McGraw-Hill / Interamericana Editores.

Hidalgo, F., Saavedra, J., Fernandez, C., & Duran, G. (2020). Stabilization of clayey soil for subgrade using rice husk ash (RHA) and sugarcane bagasse ash (SCBA). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 758(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/758/1/012041>

Huaquisto Cáceres, S., & Belizario Quispe, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(2), 225–234.

<https://dx.doi.org/10.18271/ria.2018.366>

IBM Corporation. (2023, enero 3). *Valor de significación*.

<https://www.ibm.com/docs/es/cognos-analytics/11.1.0?topic=terms-significance-value>

Ilzarbe Izquierdo, L., Tanco, M., Viles, E., & Álvarez Sánchez-Arjona, M. J. (2007). El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta.

Tecnura, 10(20), 127–138.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257021012011>

Infinitia Industrial Consulting. (2022). *Propiedades mecánicas*.

<https://www.infinitiaresearch.com/laboratorio-ingenieria-industrial/propiedades-mecanicas/>

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2019a). *SUELOS. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos* (Primera edición). Dirección de Normalización.

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2019b). *SUELOS. Método de ensayo para el análisis granulométrico* (NTP 339.128). Dirección de Normalización.

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2019c). *SUELOS. Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada (2700 kN-m/m (56000 pie-lbf/pie³))* (Primera edición). Dirección de Normalización.

James, J., & Pandian, P. K. (2017). A Short Review on the Valorisation of Sugarcane Bagasse Ash in the Manufacture of Stabilized/Sintered Earth Blocks and Tiles. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2017/1706893>

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (Segunda edición). Editorial LIMUSA.

Dosne Pasqualini, C. (2007). La investigación básica según Hans Selye. *MEDICINA*, 67(6/2), 767–770.

Lambe, W. T., & Whitman, R. V. (2012). *Mecánica de suelos (J. Jiménez y J. Rodríguez, Trans.)*. Editorial LIMUSA. (Trabajo original publicado en s. f.).

Lozano Bocanegra, E., Ruiz Ramos, J. M., & Carlos Alfonzo, J. (2015). *Análisis del mejoramiento de un suelo de subrasante con un aditivo orgánico* [Tesis de Postgrado, Universidad Católica de Colombia].
<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/aacf0ee9-a1c2-4fcb-86f8-f2e95fff0259>

Marfull Pujadas, A. (2019, diciembre 18). El método hipotético-deductivo de Karl Popper. *FU*. <https://andreumarfull.com/2019/12/18/el-metodo-hipotetico-deductivo/>

Martínez, S. (2019). *Repeated Measures: Anova*.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC]. (2014). *Manual de carreteras: suelos geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos*. Biblioteca Nacional del Perú.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC_NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7_SGGP-2014.pdf

Ministerio de Transportes [MTC]. (2018). *Glosario de términos*.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC]. (2013). *Especificaciones técnicas generales para construcción EG 2013 Tomo I*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manual_es.html

Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC]. (2014). *Manual de carreteras: suelos geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos*.

https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC_NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7_SGGP-2014.pdf

Minitab. (2023). *¿Qué es la desviación estándar?*

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/data-concepts/what-is-the-standard-deviation/>

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras* (Segunda edición). Universidad Católica de Colombia.

Mousalli-Kayat, G. (2015). *Métodos y Diseños de Investigación Cuantitativa*. Mérida. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2633.9446>

MTC. (2017). *Manual de ensayo de materiales*. Biblioteca Nacional del Perú. www.mtc.gob.pe

Niken Silmi Surjandari, Noegroho Djarwanti, & Nafisah Umri Uko. (2017). Mejora de las propiedades de ingeniería del suelo expansivo utilizando ceniza de bagazo. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/909/1/012068>

Ojeda-Farías, O., Mendoza-Rangel, J. M., & Baltazar Zamora, M. (2018). Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante. *Revista ALCONPAT*, 8(2), 194–208. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>

Pareja Salcedo, B. (2022). *Estabilización de subrasante con adición de ceniza schinus molle en la trocha carrozable Yanakillca, Provincia Antabamba, Apurímac* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/87709>

- Pascual Llobell, J., Frías Navarro, M. D., & García Pérez, J. F. (1996). Manual de psicología experimental. En Ariel España (Ed.), *Metodología de investigación* (pp. 133–162). Universitat de València.
- Portilla Yandún, F. P., & Andaluz López, R. S. (2022). *Estudio del efecto de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades físico-mecánicas en suelos finos de subrasante* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/34106>
- Real Academia Española [RAE]. (2022). *Diccionario de la lengua española*. 22° ed., [versión 22.6 en línea]. <https://dle.rae.es>
- Salas Palacios, F. F. (2022). *Mejoramiento de la subrasante del camino vecinal San Gabriel incorporando ceniza de bagazo de caña de azúcar, Abancay Apurímac 2022* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/28437>
- Sánchez Flores, F. A. (2019). Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: consensos y disensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 13(1), 102–122. <https://doi.org/10.19083/ridu.2019.644>
- Terrones Cruz, A. T. (2019a). *Estabilización de suelos arcillosos adicionando cenizas de bagazo de caña para el mejoramiento de subrasante en el sector Barraza, Trujillo – 2018* [Tesis de Pregrado]. Universidad Privada del Norte.
- Terrones Cruz, A. T. (2019b). *Estabilización de suelos arcillosos adicionando cenizas de bagazo de caña para el mejoramiento de subrasante en el sector Barraza, Trujillo – 2018* [Tesis de Pregrado, Universidad Privada

del Norte]. En *Universidad Privada del Norte*.

<https://hdl.handle.net/11537/14971>

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1978). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica* (O. Moretto, Trans.) (Segunda edición). Editorial EL ATENEO. (Trabajo original publicado en 1973).

Universidad de Sonora. (s/f). *Relación agua-cementante*. Recuperado el 13 de febrero de 2024, de

<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8650/Capitulo2.pdf>

Vidaud-Quintana, I. N., Duharte-González, A., & Yero-Ramírez, E. O. (2019). Consideraciones para la construcción de carreteras en una zona sísmica. *Ciencia en su PC*, 1(4), 86–96.

<https://www.redalyc.org/journal/1813/181358738017/html/>

ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA DE LA INVESTIGACIÓN.

ANEXO 2: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.

ANEXO 3: NORMAS ESTANDARIZADAS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.

ANEXO 4. CÁLCULOS PARA LA GRADACIÓN DE LOS SUELOS.

ANEXO 5. TABLA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN MÉTODO AASHTO.

ANEXO 6. TABLA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN MÉTODO SUCS.

ANEXO 7. TABLA PARA LA ELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO A, B O C DEL PROCTOR MODIFICADO.

ANEXO 8. CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA MÁXIMA DENSIDAD SECA DEL SUELO.

ANEXO 9. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EL VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA.

ANEXO 10. INSTRUMENTOS VALIDADOS.

ANEXO 11. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.

Los anexos están resguardados en la Oficina del Repositorio Digital Institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes.