

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**Evaluar la influencia del compuesto romerillo y carbón molido para mejorar las propiedades mecánicas de la subrasante del tramo: caserío Mashuyacu empalme Rioja**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**AUTOR**

**Gerardo Ivan Rojas Nizama**

**ASESOR**

**Luis Quiroz Quiñones**

**<https://orcid.org/0000-0001-9193-0307>**

**Chiclayo, 2026**

**Evaluar la influencia del compuesto romerillo y carbón molido  
para mejorar las propiedades mecánicas de la subrasante del  
tramo: caserío Mashuyacu empalme Rioja**

PRESENTADA POR

**Gerardo Ivan Rojas Nizama**

A la Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo  
para optar el título de

**INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR

Joaquin Hernan Rojas Oblitas  
PRESIDENTE

Angel Alberto Lorren Palomino  
SECRETARIO

Luis Quiroz Quiñones  
VOCAL

## **Dedicatoria**

Agradezco profundamente a mi familia, quienes con su comprensión, cariño y respaldo constante han sido mi mayor impulso para avanzar. A mis padres: Geraldine y Javier, sobre todo, por inculcarme el valor del trabajo duro y la constancia, por el sacrificio de principio a fin en todo este trayecto. A mi hermana Diana, por ser una fuente continua de inspiración y recordarme siempre la relevancia de luchar por mis metas. Extiendo también mi gratitud a mi pareja Solange por haber sido pilar y motivación de seguir adelante en todos los momentos y a Frank, cuyo aliento y compañía me ayudó en que este trayecto sea mucho más ameno.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por otorgarme salud y bienestar. Mi reconocimiento especial al ingeniero Luis Quiroz Quiñones, cuya experiencia y guía resultaron esenciales para la realización de este trabajo. A mi familia, por su respaldo incondicional y por ser mi fuente constante de ánimo para continuar. Al laboratorista, por compartir sus conocimientos, su trato cordial y la confianza brindada desde el primer día hasta el final de este proceso. Asimismo, a todas las personas que, de alguna forma, aportaron a la ejecución de este objetivo, les expreso mi más profundo agradecimiento. Su apoyo y confianza han sido clave para alcanzar este logro. Pido a Dios derrame bendiciones, cuide y guíe a todas las personas involucradas.

Evaluar la influencia del compuesto Romerillo y Carbón molido para mejorar las propiedades mecánicas de la subrasante del tramo: caserío Mashuyacu empalme Rioja

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

[hdl.handle.net](https://hdl.handle.net)

Fuente de Internet

2%

2

[repositorio.ucv.edu.pe](https://repositorio.ucv.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

3

[tesis.usat.edu.pe](https://tesis.usat.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

4

Submitted to City University of New York System

Trabajo del estudiante

<1%

5

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

<1%

6

Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador

Trabajo del estudiante

<1%

7

[repositorio.udh.edu.pe](https://repositorio.udh.edu.pe)

Fuente de Internet

<1%

8

[www.repositorio.upla.edu.pe](https://www.repositorio.upla.edu.pe)

Fuente de Internet

<1%

9

Submitted to Universidad Privada del Norte

Trabajo del estudiante

<1%

10

[ri.uagro.mx](https://ri.uagro.mx)

Fuente de Internet

<1%

[repositorio.urp.edu.pe](https://repositorio.urp.edu.pe)

## ÍNDICE

<i>Introducción</i> .....	11
<i>Revisión de la literatura</i> .....	15
<i>Bases teóricas</i> .....	19
<i>Materiales y métodos</i> .....	33
<i>Diseño de investigación</i> .....	33
<i>Hipótesis</i> .....	33
<i>Población, muestra y muestreo</i> .....	34
<i>Resultados y Discusiones</i> .....	44
<i>Conclusiones</i> .....	69
<i>Recomendaciones</i> .....	70
<i>Referencias</i> .....	71
<i>Anexos</i> .....	73

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Fases del suelo</i> .....	20
<i>Ilustración 2: Métodos para estabilizar suelos [15]</i> .....	21
<i>Ilustración 3: Carbón molido</i> .....	23
<i>Ilustración 4: Elaboración propia-Muestra de Romerillo</i> .....	24
<i>Ilustración 5: Granulometría por Hidrómetro o por Sedimentación</i> .....	29
<i>Ilustración 6: Localización de Calicatas en la carretera Mashuyacu</i> .....	40
<i>Ilustración 7: Extracción de muestra, calicata C-01</i> .....	41
<i>Ilustración 8: Extracción de muestra, calicata C-02</i> .....	41
<i>Ilustración 9: Extracción de muestra, calicata C-03</i> .....	42
<i>Ilustración 10: Extracción de muestra, C-04</i> .....	42
<i>Ilustración 11: Extracción de muestra, calicata C-05</i> .....	43
<i>Ilustración 12: Muestra de Romerillo</i> .....	43
<i>Ilustración 13: Contenido de Humedad</i> .....	73
<i>Ilustración 14: Granulometría por Tamizado</i> .....	73
<i>Ilustración 15: Límites de consistencia</i> .....	74
<i>Ilustración 16: Gravedad Específica</i> .....	74
<i>Ilustración 17: Proctor Modificado</i> .....	75
<i>Ilustración 18: CBR Natural</i> .....	76
<i>Ilustración 19: Tierra Natural más mezcla de Romerillo y Carbón Molido</i> .....	77

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla I: Clasificación de suelos [12]</i> .....	19
<i>Tabla II: Curva de la distribución del tamaño de la partícula [12]</i> .....	20
<i>Tabla III: Categorías - Subrasante</i> .....	22
<i>Tabla IV: Composición química Carbón [19]</i> .....	23
<i>Tabla V: Resultados de FRX del Romerillo</i> .....	25
<i>Tabla VI: Resultados de FXR del Carbón Molido</i> .....	26
<i>Tabla VII: Tamaño de Partículas</i> .....	27
<i>Tabla VIII: Tamices para granulometría según MTC</i> .....	27
<i>Tabla IX: Índice de Plasticidad-Clasificación</i> .....	31
<i>Tabla X: Categorías según el MTC – Subrasantes</i> .....	32
<i>Tabla XI: Operacionalización de Variables</i> .....	34
<i>Tabla XII: Frecuencia de Calicatas</i> .....	35
<i>Tabla XIII: Muestras de Contenido de Humedad</i> .....	36
<i>Tabla XIV: Muestras Granulometría por tamizado</i> .....	36
<i>Tabla XV: Muestras Gravedad Específica</i> .....	36

<i>Tabla XVI: Muestras de Límites de Consistencia.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla XVII: Muestras para Proctor.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla XVIII: Muestras para CBR.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla XIX: Coordenadas de Calicatas.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla XX: Coordenadas Calicatas (18M-UTM).....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla XXI: Matriz de Consistencia.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla XXII: Composición Química del Romerillo.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla XXIII: Composición Química del Carbón Molido.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla XXIV: Contenido de Humedad.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla XXV: Distribución Granulométrico C-01.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla XXVI: Distribución Granulométrico C-02.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla XXVII: Distribución Granulométrico C-03.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla XXVIII: Distribución Granulométrico C-04.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla XXIX: Distribución Granulométrico C-05.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla XXX: Distribución Granulométrico Romerillo.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla XXXI: Gravedad Específica.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla XXXII: Tabla de Límites de Atterberg.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla XXXIII: Límites Romerillo.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla XXXIV: Clasificación según AASHTO Y SUCS.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla XXXV: Proctor Modificado Suelo Natural.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla XXXVI: Proctor Modificado C-01+ Adición.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla XXXVII: Proctor Modificado C-03 + Adición.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla XXXVIII: Proctor Modificado C-05 + Adición.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla XXXIX: CBR Promedio Calicata 01.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla XL: CBR Promedio Calicata 03.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla XLI: CBR Promedio Calicata 05.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla XLII. Determinación óptima de adición de CBCE.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla XLIII: Valores de CBR - C01.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla XLIV: Valores de CBR - C03.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla XLV: Valores de CBR - C05.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla XLVI: Valores de CBR in C-1-03-05 +14%R.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla XLVII. Valores de CBR in C-1-03-05 +14%CM.....</i>	<i>65</i>

## LISTA DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1: PM Suelo Natural Promedio Calicata 01 .....</i>	<i>46</i>
<i>Gráfico 2: Variación de MDS C-01 .....</i>	<i>48</i>
<i>Gráfico 3: PM Suelo Natural Promedio Calicata 02 .....</i>	<i>49</i>
<i>Gráfico 4: PM Suelo Natural Promedio Calicata 03 .....</i>	<i>50</i>
<i>Gráfico 5: Variación de MDS C-03 .....</i>	<i>51</i>
<i>Gráfico 6: PM Suelo Natural Promedio Calicata 04 .....</i>	<i>51</i>
<i>Gráfico 7: PM Suelo Natural Promedio Calicata 05 .....</i>	<i>53</i>
<i>Gráfico 8: Variación de MDS C-05 .....</i>	<i>53</i>
<i>Gráfico 9: CALICATA 01 - PENETRACIÓN 56, 25, 12 GOLPES.....</i>	<i>54</i>
<i>Gráfico 10 CALICATA 02 – PENETRACIÓN 56, 25, 12 GOLPES .....</i>	<i>54</i>
<i>Gráfico 11: CALICATA 03 - PENETRACIÓN 56, 25, 12 GOLPES.....</i>	<i>55</i>
<i>Gráfico 12: CALICATA 04 - PENETRACIÓN 56, 25, 12 GOLPES.....</i>	<i>56</i>
<i>Gráfico 13: CALICATA 05 - PENETRACIÓN 56, 25, 12 GOLPES.....</i>	<i>56</i>

## Resumen

En la construcción, es común emplear materiales como la cal, el cemento u otros aditivos para mejorar la estabilidad de subrasantes compuestas por suelos arcillosos. No obstante, la producción de estos materiales genera impactos ambientales negativos y conlleva costos elevados. Por este motivo, la investigación se basó en analizar el efecto de incorporar romerillo y carbón molido como estabilizantes alternativos para suelos arcillosos utilizados en subrasantes. Se probaron diferentes proporciones de mezcla, específicamente 6%, 10% y 14%. La composición química del romerillo y el carbón molido se determinó mediante Fluorescencia de Rayos-X. Adicionalmente, se realizó pruebas de gravedad específica, granulometría, límites de Atterberg, Proctor y CBR sobre un suelo clasificado como CL, evaluando tanto el suelo sin tratamiento como el estabilizado con las mezclas mencionadas. Los resultados indicaron que los límites líquido y plástico disminuyen en relación con el aumento del porcentaje de romerillo y carbón molido, mientras que el valor del CBR mostró un incremento progresivo hasta alcanzar el 14% de adición. Se concluyó que la proporción óptima para la mezcla estabilizante fue del 14%, ya que el CBR mejoró al 95% en un 121.82%, 70.69% y 68.65% en las calicatas 01, 03 y 05, respectivamente. Por último, el análisis económico reveló que la mezcla de romerillo y carbón molido es una alternativa más rentable en comparación con la estabilización tradicional mediante cal y cemento.

**Palabras clave:** *Estabilización de suelos arcillosos; subrasantes; romerillo; carbón molido; Proctor; CBR.*

### **Abstract**

In construction, it is common to use materials such as lime, cement, or other additives to improve the stability of subgrades composed of clayey soils. However, the production of these materials generates negative environmental impacts and entails high costs. For this reason, the research was based on analyzing the effect of incorporating rosemary and ground charcoal as alternative stabilizers for clayey soils used in subgrades. Different mixing proportions were tested, specifically 6%, 10%, and 14%. The chemical composition of rosemary and ground charcoal was determined using X-ray fluorescence. Additionally, specific gravity, particle size distribution, Atterberg, Proctor, and CBR limits were tested on a soil classified as CL, evaluating both the untreated soil and the soil stabilized with the aforementioned mixtures. The results indicated that the liquid and plastic limits decreased with increasing percentages of rosemary and ground charcoal, while the CBR value showed a progressive increase until reaching a 14% addition. The optimal ratio for the stabilizing mixture was found to be 14%, as the CBR improved to 95% by 121.82%, 70.69%, and 68.65% in pits 01, 03, and 05, respectively. Finally, the economic analysis revealed that the mixture of rosemary and ground coal is a more cost-effective alternative compared to traditional stabilization using lime and cement.

**Keywords:** *Stabilization of clay soils; subgrades; romerillo; ground coal; proctor; CBR.*

## **Introducción**

El progresivo crecimiento demográfico y su impacto en diversos puntos de la civilización representan un desafío en el siglo actual, esto llevó a cabo que la supervisión de la calidad de del material empleado en obras se basará en la constatación de características físicas-mecánicas que sean especificadas con normativa de producto. La normativa presenta rangos y valores que las propiedades deben ser analizadas para la aprobación de estos productos y garantizar calidad al usuario y al comprador. [1] Además, los recursos naturales como los áridos son muy importantes en la producción de hormigón, ladrillos y adoquines, pero conforme la población crece, aumenta la necesidad en la industria de la construcción como: servicios básicos, viviendas e infraestructura peatonal y vial.

Las vías en el Perú de material afirmado suman en el desarrollo, una economía estable, al nivel de servicialidad, transitabilidad y conectividad del país. Son más conocidas como carreteras de tierra compactada que son esenciales para conectar áreas remotas y rurales, donde otras formas de transporte pueden ser difíciles de acceder.

Aunque las carreteras de material afirmado son más vulnerables a fenómenos naturales como lluvias intensas o deslizamientos, su construcción ha aumentado la capacidad de resistencia frente a estos situaciones al ofrecer rutas alternativas cuando las carreteras pavimentadas resultan afectadas, dado que, en la región de San Martín, una alternativa para los gobiernos locales son las vías vecinales de material afirmado adicionando un tratamiento o con distintos materiales en busca de mejorar las condiciones del mismo.

Por consiguiente, las investigaciones realizadas tienen como objetivo mejorar las vías a nivel subrasante con distintos estabilizantes y obtener una mejora en las propiedades físico-mecánicas, creando vías útiles con un plazo mayor, con mejoras en condiciones de servicio, resistentes a la intemperie y climatología. Con el propósito de atribuir y contribuir al caserío Mashuyacu, careciente de vías óptimas para el servicio de la transitabilidad fluida de vehículos tanto liviano como pesados, teniendo en cuenta la suspensión de partículas totales (PTS) que estima un alto índice de contaminación local y enfermedades respiratorias en dicha población y habitantes aledañas a la vía en mención. [2]

Los nuevos métodos tecnológicos constructivos y uso de materiales son puestos en práctica en la actualidad con mucha más frecuencia con el logro de encontrar el aumento de resistencia, calidad, estabilidad, teniendo en cuenta lo económico y ecológico en el rubro Civil. La

justificación teórica, está basada en emplear fundamentos normativos y teóricos del diseño de la vía y consecuentemente ser útil para el desempeño de futuros proyectos. Es importante destacar que tener un buen acceso es crucial, porque las infraestructuras viales impactan de manera directa en el progreso de sectores como el turismo, la educación, la salud y el comercio.

De acuerdo con datos proporcionados por el (MTC) del Perú, la nación dispone de amplia red de carreteras afirmadas que alcanza una extensión aproximada de 71,000 kilómetros. Estas vías son esenciales para mantener la conectividad y apoyar sectores como comercio, educación, el turismo y la salud en todo el país. [3]

Cuando los suelos destinados a subrasantes en proyectos presentan un valor de capacidad de soporte (CBR) inferior al mínimo requerido, se aplican diversos métodos y productos para mejorar sus propiedades y aumentar su resistencia. El Manual de Carreteras nos indica que un suelo con un CBR menor al 6% no es apto para su uso en obras, ya que indica que el suelo es de mala calidad, caracterizándose por ser blando, insuficiente, inadecuado y compresible, lo que compromete su desempeño como subrasante. [17]

Para optimizar las características de los suelos arcillosos, es necesario estabilizarlos mediante métodos físicos o químicos. En la construcción, es común emplear estabilizadores químicos (cal y cemento) para mejorar estos suelos con el fin de incrementar su capacidad portante y durabilidad en obras de construcción. Sin embargo, el uso de estos materiales presenta desventajas importantes, ya que su producción genera contaminación ambiental y sus costos son elevados.

Según Tuesta [8], En cuanto a la justificación, busca evaluar el efecto que tiene la incorporación del romerillo en conjunto con la melaza de caña en las propiedades del suelo. En este proyecto se analizaron las propiedades químicas-físicas de un suelo natural del ingreso, concluyendo que la mayoría de las muestras son suelos arenosos-limosos del tipo FS, así mismo se obtuvo un CBR del romerillo sin melaza la MDS de 15.40% y porcentaje de compactación de 19.53% de la MDS. La mezcla con melaza de caña en 1%, 3% y 4.5% se evidencia un aumento en el valor del CBR y entre la capacidad de soporte del material, para establecer que el 3% es la dosificación ideal para la capa de rodadura. Esta combinación mejora la resistencia y adherencia en comparación con el romerillo sin melaza. Además, la melaza ayuda a mitigar problemas de polvo en verano y erosión en la temporada de lluvias. El porcentaje óptimo de melaza es 3%, lo que equivale a 66.3 litros por metro cúbico de romerillo.

Las conclusiones obtenidas en el estudio revelan que al incorporar de melaza de caña resulta eficaz para la estabilización de subrasantes de baja resistencia, evidenciando un aumento notable en el módulo de resiliencia y en capacidad portante. Estos hallazgos indican que la melaza de caña constituye una alternativa viable para fortalecer las subrasantes en la construcción de carreteras.

El carbón molido (CM) es un subproducto que contiene principalmente carbono (C) y sílice ( $\text{SiO}_2$ ), lo que le confiere propiedades beneficiosas para la estabilización de suelos. Debido a su composición, el carbón molido posee la característica de mejorar tanto física y químicamente el suelo, incrementar la retención de agua y nutrientes, de igual manera estimular la actividad microbiana. Estos efectos contribuyen significativamente a optimizar las propiedades de los suelos arcillosos cuando se utiliza como estabilizante.

Se optó por combinar la adición de romerillo (R) y carbón molido (CM) con el propósito de aprovechar un efecto sinérgico derivado de sus propiedades químicas complementarias se emplea la estabilización de suelo arcilloso con el propósito de fortalecer la cohesión interna y elevar la capacidad portante del suelo. El romerillo aporta sílice reactiva y contiene calcio ( $\text{CaO}$ ), mientras que el carbón molido contribuye con sus características particulares, lo que favorece la generación de reacciones puzolánicas. La integración de estos aditivos posibilita superar ciertas limitaciones individuales de cada uno, proporcionando una opción más económica y ambientalmente sostenible frente a estabilizantes tradicionales, tales como la cal y el cemento.

En el distrito de Rioja, se observa que muchos de los caminos afirmados están gravemente dañados, lo cual se debe a baja capacidad del suelo empleado, una mala estabilización de subrasante, evidenciada por la falta de cohesión entre los materiales gruesos y finos. En consecuencia, se agregó el material romerillo en mezcla con el carbón molido con el fin de incrementar el CBR y optimizar la capa de subrasante y evitar que las condiciones climáticas tengan efecto en dicha capa. Asimismo, surge la siguiente pregunta puntual del problema de investigación: ¿De qué manera influye la combinación de romerillo y carbón molido en la mejora de las propiedades mecánicas de la subrasante en el tramo Mashuyacu, y puede esta mezcla garantizar un mejoramiento efectivo de dichas características? La hipótesis de la investigación sostiene que la incorporación de una mezcla de romerillo y carbón molido puede mejorar las propiedades de los suelos arcillosos destinados a subrasantes.

Esta investigación busca analizar cómo afecta la incorporación de una mezcla de romerillo y carbón molido en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de la subrasante en el tramo Mashuyacu-Empalme Rioja. Para cumplir con este propósito se ha definido los siguientes objetivos específicos: primero, determinar la composición química de ambos materiales mediante Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X para conocer sus características elementales; luego, Analizar las características físicas-mecánicas tanto del suelo en estado natural como del suelo después de su modificación con porcentajes de adición del 6%, 10% y 14% de la mezcla, con el fin de analizar su incidencia en la subrasante. Además, se clasificará el suelo según las normas SUCS y AASHTO para establecer una base de interpretación de los resultados. También se analizará el comportamiento de los suelos granulares al incorporar estos compuestos, identificando cuál material y en qué proporción aporta mayores mejoras a las propiedades mecánicas. Finalmente, se realizará un análisis económico para estimar el costo asociado a la aplicación del compuesto romerillo-carbón molido en el mejoramiento de la subrasante, con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica y financiera, y se determinará cuál de los materiales y en qué porcentaje tiene un mayor impacto en las propiedades mecánicas del suelo.

Esta investigación tiene como propósito impulsar el uso del material granular romerillo en combinación con el carbón molido, sustentando su empleo mediante fundamentos teóricos, normativos y prácticos aplicados al diseño de vías, particularmente en las subrasantes. Para ello, se recopilarán datos relevantes, como el Proctor modificado, la granulometría, los valores de CBR entre otros ensayos, tanto en su estado natural como con la inclusión de la mezcla del romerillo y carbón molido. Con esta información, se busca desarrollar un modelo o una dosificación que optimice las propiedades del material, asegurando un desempeño eficiente y de calidad en las subrasantes destinadas a vías.

Lograr una subrasante de calidad en la localidad de Mashuyacu genera múltiples beneficios. Por un lado, garantiza un tránsito confiable una vez concluido el proyecto vial, promoviendo un transporte seguro y eficiente de personas y mercancías. Una carretera en buen estado no solo facilita el comercio, sino que también potencia el turismo y permite que los productos locales lleguen a mercados más amplios. Asimismo, mejora la conectividad hacia servicios esenciales como salud y educación, promoviendo así mayor movilidad y accesibilidad en la zona.

Mejorar la accesibilidad podría incentivar el desarrollo del turismo en el caserío, especialmente si este cuenta con atractivos naturales o culturales relevantes. El incremento en

la afluencia de visitantes generaría ingresos adicionales a través de la venta de productos locales, servicios de alojamiento y diversas actividades turísticas, contribuyendo así al crecimiento económico de la comunidad.

Desde una perspectiva ambiental, resulta fundamental considerar los impactos de este proyecto. Una subrasante bien planificada, y eventualmente una vía afirmada, contribuiría a la preservación de la biodiversidad, disminuiría la incidencia de enfermedades respiratorias causadas por partículas suspendidas y promovería prácticas sostenibles entre los habitantes. Mediante la elaboración de un plan de gestión ambiental en colaboración con la Municipalidad, se podrían establecer estrategias orientadas al manejo eficiente de los residuos sólidos, la conservación de la vegetación y la gestión responsable de los recursos hídricos, logrando de esta manera un equilibrio entre proteger el medio ambiente y la comunidad.

## **Revisión de la literatura**

### ***Antecedentes Nacionales***

G. G. Graciela et al “*Utilización del agregado romerillo en el diseño del concreto  $f'c = 280\text{kg/cm}^2$  para elevar la resistencia mecánica a compresión, Rioja*”, 2022[9]

La investigación se enfoca en analizar la factibilidad de incrementar la resistencia del concreto sustituyendo el agregado fino por romerillo en diferentes porcentajes (25%, 50% y 75%). También busca comprender y ajustar los procedimientos necesarios. Se clasifica como investigación aplicada, con un diseño preexperimental. El agregado romerillo se identifica como la variable independiente, por otro lado, la resistencia a la compresión constituye la variable dependiente del estudio. La selección de la población y muestra se basa en observaciones previas y posteriores a la introducción del agregado romerillo, y se empleará la técnica de observación experimental para facilitar el desarrollo de la investigación.

Los resultados revelan una humedad del 6.33% y diversas medidas de peso específico, absorción y tamaño máximo. Se determina que la sustitución del 75% del agregado fino por romerillo produce una resistencia al concreto más cercana al estándar. El valor más alto de resistencia obtenido es de  $216.03\text{ kg/cm}^2$  a los 28 días. Además, se calcula el costo por  $\text{m}^3$  de concreto estándar y con romerillo. Para el concreto estándar el precio es de S/. 500.7 y para el concreto con romerillo es de S/. 483.4, siendo este último más económico con un ahorro de S/. 17.28 en comparación con el concreto convencional.

S. B. C. Malca, *“Influencia de la mezcla del romerillo con material ligante arcilloso en la estabilización del afirmado del tramo: El Porvenir y el sector Tamboyacu, distrito Elías Soplín Vargas, Rioja - San Martín”*, 2017[7]

Desde una perspectiva metodológica, el estudio se fundamentó en la operacionalizar variables, la determinación de la muestra y población, así como en la aplicación de diversos métodos para obtención de datos. Además, se aseguró la validación y confiabilidad de las herramientas empleadas en el análisis de la información. Estos procedimientos permitieron evaluar tanto la viabilidad como la efectividad de la combinación estudiada, considerando las características físico-mecánicas del afirmado, así como su repercusión económica. En cuanto la metodología de trabajo, los materiales fueron ensayados conforme a Proctor Modificado, CBR, que incluye compactación, expansión y penetración, se realizó la granulometría, el límite líquido y el índice de plasticidad correspondiente al suelo con sus dosificaciones en el laboratorio. La información recopilada se utilizó para comparar y procesar los datos mediante gráficos, fórmulas y programas computacionales ingenieriles.

La investigación evidenció que al mezclar romerillo con materiales arcillosos ligantes tiene un efecto positivo sobre las propiedades físico-mecánicas al estabilizar un afirmado, dosificando 85% (romerillo) y 15% (materiales ligantes arcillosos). Esta proporción resulta viable y cumple con los requisitos definidos por el MTC. De acuerdo al aspecto económico, el estudio de costos indica una reducción en la inversión al utilizar esta nueva combinación de materiales.

Córdova Rosa et al *“Efecto de la melaza y carbón molido en la estabilización de subrasante en vía no pavimentada, distrito de Laredo, Trujillo”*, 2021. [10]

El estudio tuvo como finalidad analizar la influencia del carbón molido junto con melaza de caña para estabilizar subrasantes. Se concluyó en los ensayos revelaron que tanto la calicata 1 como la calicata 2 presentan suelos clasificados como arcillas de baja plasticidad (CL), con índices de plasticidad de 6 y 11. En relación con el Índice de Densidad Máxima Seca (MDS), se registraron valores de 1.9 para la calicata 1 y 1.88 para la calicata 2. En relación al California Bearing Ratio (CBR), se registró un valor del 6.9% para el 95% y 10.10% para el 100% en la calicata 1, mientras que para la calicata 2 se obtuvieron valores de 7.1% para el 95% y 9.81% para el 100%.

Se utilizaron diferentes porcentajes de melaza, 3, 6 y 9% con respecto del suelo seco, junto con cantidades equivalentes de carbón molido mineral. Se realizó ensayos de CBR, Proctor modificado y determinación de los límites de consistencia. Se observó que al agregar 3%, 6% y 9% de carbón molido a la muestra C-1, el Índice de Carga Hinchamiento (OCH) fue de 11.75%, 11.82% y 11.94%, respectivamente, estos valores permitieron ajustar la compactación en el campo. Determinaron que la óptima dosificación de carbón molido es del 6%, alcanzando un valor máximo de CBR de 11.09% a la densidad máxima seca (100%) y de 7.94% al 95% de dicha densidad. Además, con un 9% de melaza de caña, se alcanzó un CBR máximo del 12.23% al 100% y del 8.50% al 95%. También se demostró que una combinación de ambos aditivos es efectiva al 6%.

### ***Antecedentes Internacionales***

Akinwumi et al. *“Soil Improvement Using Blends of Coal Ash and Plantain Peel Ash as Road Pavement Layer Materials”*, 2023 [4]

La presente investigación buscó evaluar el potencial de las mezclas de cenizas del carbón (CA) y cenizas de la cáscara de plátano (PPA) para potenciar las propiedades del suelo y su viabilidad en la construcción de capas de pavimento vial. Para ello, se realizó un análisis geotécnico que incluyó pruebas de límites, CBR, además de estudios de difracción de rayos X (XRD) y microscopía electrónica de barrido (SEM), con el fin de examinar los efectos de estas mezclas sobre las características del suelo.

El estudio mostró una mejoría en la capacidad portante del suelo tras la incorporación de ambas cenizas, por un aumento en el peso máximo y una reducción en el índice de plasticidad. El análisis mediante (XRD) reveló que se formó calcita en el suelo tratado, lo que confirma la mejora de las propiedades puzolánicas gracias a la combinación de cenizas.

La proporción óptima de aditivo se identificó en 9% de CA + 6% de PPA, donde se observó un incremento del 17.70% en el peso máximo unitario del suelo natural seco y un aumento del 23.53% en el CBR con la inclusión de los estabilizadores. Sin embargo, se destacó la importancia de controlar de manera precisa las proporciones de los aditivos para prevenir una disminución capacidad portante. Asimismo, propuso la combinación de (CA) y (PPA) podría resultar beneficiosa en otras aplicaciones relacionadas con la estabilización del suelo, tales como la rehabilitación de minas y la fabricación de mezclas de concreto.

Zimar et al, “*Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilization: A review*”, 2022 [6]

El estudio se enfocó en la mejora de las propiedades mecánicas-físicas e hidráulicas de suelos expansivos por medio de la incorporación de ceniza volante de carbón (CFA) y ceniza volante clase F (FFA), prestando especial atención a resistencia y durabilidad de los pavimentos. Los resultados arrojaron que la adición de CFA y FFA incrementa significativamente la resistencia a la compresión no confinada (UCS) en los estabilizados, lo que significa que existe una mejora y la durabilidad de las capas de pavimento. Asimismo, el (XRD) reveló la formación de geles cementantes y modificaciones en la mineralogía del suelo tratado, lo que respalda el resultado obtenido en los ensayos y confirma la efectividad del tratamiento.

Se constató que (UCS), (CBR) y el módulo resiliente presentan incrementos significativos con la incorporación de cenizas volantes y conforme avanza el tiempo de curado en la mayoría de los suelos blandos. Se recomienda el 15% de cenizas volantes clase C con 7 días de curado para la mayoría de suelos blandos, mientras que para las cenizas volantes clase F, se sugiere usar entre 9 y 12% de cenizas volantes con cal para lograr el mejor rendimiento. El tiempo de curado incrementa el módulo resiliente hasta un 40%, y se observa una mayor ganancia de resiliencia entre los 7 y 14 días.

T. Zafar et al, “*Soil stabilization by reinforcing natural and synthetic fibers – A state of the art review*”, 2023 [5]

El estudio se orienta a analizar el impacto que diferentes tipos de fibras, tanto naturales como sintéticas, tienen sobre las propiedades geotécnicas de suelos expansivos, con el fin de mejorar su comportamiento mecánico y reducir problemas asociados a su alta plasticidad y susceptibilidad a cambios volumétricos. La investigación también busca ofrecer una actualización sobre estabilizar suelos por fibras, lo cual es beneficioso para ingenieros geotécnicos e investigadores en construcción e ingeniería civil. Se estudiaron los efectos de fibras al estabilizar, particularmente en combinación con cenizas volantes (FA), y se evaluaron los beneficios geotécnicos y ambientales de esta técnica.

Los hallazgos principales indican que agregar FA y fibras a los suelos expansivos mejora significativamente sus propiedades geotécnicas. Se determinó que la inclusión de cenizas volantes aumenta el valor CBR entre un 80% y un 110%, y la adición de fibras geotécnicas

puede incrementar este valor adicionalmente entre un 40% y un 50%. Además, el suelo era un 94.4% más estable y una resistencia a la compresión sin confinamiento mucho mejor que antes.

La investigación concluye que la combinación de cenizas volantes y fibras puede ser una solución viable para estabilizar suelos expansivos, útil para la construcción de infraestructuras como edificios, carreteras y puentes. Esto ayuda a los profesionales de la ingeniería geotécnica a seleccionar fibras apropiadas para la estabilización del suelo y proporcionar la base de futuras referencias, con un método de gran utilidad y de bajo costo.

## Bases teóricas

### *Suelo*

El enfoque se centra en la capa más cercana a la superficie de la corteza terrestre, constituida por mineral, aire, agua, materia orgánica, y seres vivos, que interactúan y se desarrollan dentro de un entorno dinámico y en continuo cambio.

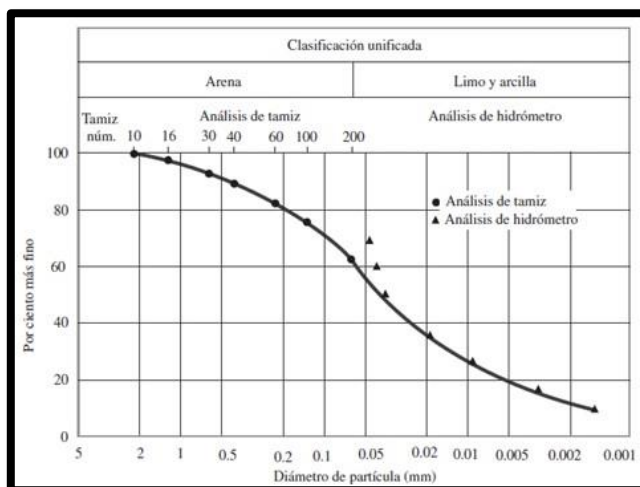
Los suelos se clasifican en base en una variedad de características, que incluyen el color, la composición mineralógica, la textura, la estructura y la capacidad para retener agua.[11]

Clasificación de suelos según distintas normas:

*Tabla I: Clasificación de suelos [12]*

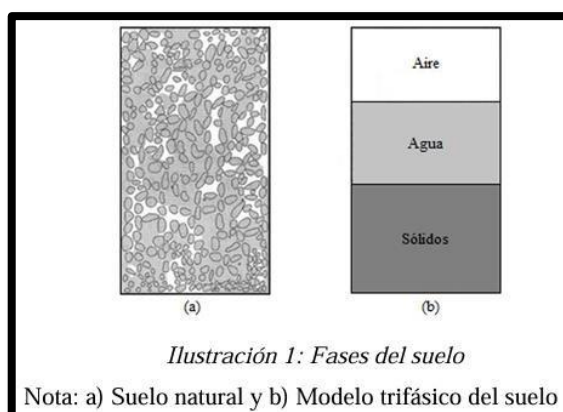
Nombre de la organización	Tamaño de grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (p.ej., limos y arcillas) <0.075	

Tabla II: Curva de la distribución del tamaño de la partícula [12]



El suelo se constituye en 3 fases:

- Sólida: Constituida por el mineral presente en el suelo.
- Líquida: Compuesta por agua que se encuentra retenida en espacio vacío.
- Gaseosa: Compuesta por el aire contenido en los poros del suelo.



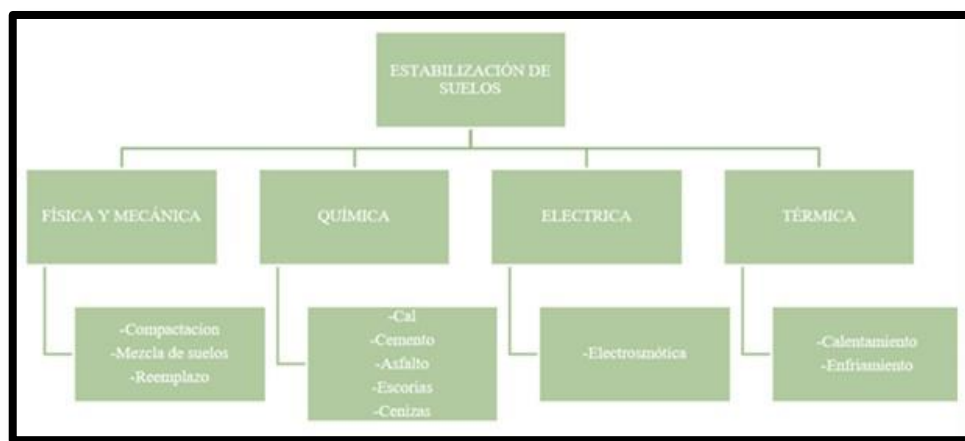
*Ilustración 1: Fases del suelo*

### Propiedades físicas de un suelo

La composición define diversas características denominadas propiedades físicas o mecánicas, entre las que se incluyen la permeabilidad, porosidad, capacidad de drenaje, textura, estructura, color, consistencia y la reducción efectiva, entre otras. Estas propiedades se dividen según tamaño de partícula, distinguiendo entre finas y gruesas. [13]

## Estabilización de suelos

Es el mejoramiento de sus propiedades físicas a través de técnicas mecánicas y la incorporación de agentes químicos, tanto naturales o sintéticos. Es crucial la selección del método adecuado para estabilizar que mejore las propiedades fundamentales del suelo, lo cual requiere realizar pruebas en el laboratorio para evaluar dichas propiedades. También es fundamental que los ingenieros conozcan las distintas técnicas de estabilización del suelo, dado que cada método es vital y efectivo para diferentes clases de suelo. [14][15]



*Ilustración 2: Métodos para estabilizar suelos [15]*

## Categorización de Suelos

La categorización se fundamenta en propiedades mecánicas y cómo se comporta al aplicarse en obras civiles, lo que ayuda a categorizar de forma precisa. Los que más se utilizan actualmente son el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El método AASHTO se emplea principalmente para la clasificación de suelos y subrasantes, dividiéndolos en 7 grupos (A-1 hasta A-7). Los suelos con partículas gruesas se agrupan en las categorías A-1, A-2 y A-3, mientras que los de más del 35% de sus partículas finas que pasan el tamiz N° 200 se ubican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, predominantemente arcillosos y limosos. Este sistema considera parámetros como el tamaño de los granos y la plasticidad. El SUCS, por su parte, divide en 2 grupos: granular, que están formados mayormente por arena y grava, y de grano fino, donde más del 50% atraviesa el tamiz N°200 y finos. Para realizar una clasificarlos adecuadamente, se consideran factores como la proporción de grava, arena, limos y arcillas, junto a granulometría y límites de consistencia del suelo. [16]

## Subrasante

Es la capa que soporta el pavimento. Para que sea adecuada, debe estar compuesta por materiales que resulten en un CBR mayor al 6%. Si el valor es menor, será una subrasante careciente o inadecuada que requiere distintos procesos de mejoramiento.

La superficie final, correspondiente al nivel de movimiento de tierra, es la subrasante, y sobre ella se instalará el afirmado o pavimento. Los suelos ubicados debajo de la subrasante deben presentar estabilidad y condiciones adecuadas, con un índice CBR superior al 6% a una profundidad menor a 0.60 metros. En caso de que el suelo presente un CBR inferior al 6%, se deberá encontrar una solución de estabilización alternativa acorde a las características del suelo.[17]

La subrasante está constituida por el terraplén, este corresponde al terreno natural en las excavaciones, y en ella se apoyará el pavimento. Estos suelos deben poseer características adecuadas y ser compactados en capas para crear una estructura óptima capaz de soportar el peso del tráfico. La calidad de la subrasante influye directamente en la capacidad de soporte adecuada que deben proporcionar la subbase y/o la base del pavimento. Si la subrasante presenta problemas, estos se manifestarán en desplazamientos y grietas cuando se exponga al tráfico y al desgaste natural. [18]

*Tabla III: Categorías - Subrasante*

Categoría de Sub rasante	CBR
Sub rasante inadecuada	CBR < 3%
Sub rasante insuficiente	CBR ≥ 3% a CBR < 6%
Sub rasante inadecuada	CBR ≥ 6% a CBR < 10%
Sub rasante buena	CBR ≥ 10% a CBR < 20%
Sub rasante muy buena	CBR ≥ 20% a CBR < 30%
Sub rasante excelente	CBR ≥ 30%

**Fuente.** Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos 2013.  
Ministerio de transportes y Comunicaciones

## Carbón Molido

El carbón molido es un material granular producido al triturar carbón natural hasta obtener partículas finas. Este proceso incrementa su superficie específica, lo que mejora su reactividad y lo hace apto para distintas aplicaciones de ingeniería. En la estabilización de suelos, se utiliza carbón molido como aditivo para optimizar las propiedades físico-mecánicas del suelo, tales como la capacidad portante y la resistencia a la compresión.[19]



*Ilustración 3: Carbón molido*

#### Composición Química:

- Carbono: El contenido de carbono suele variar entre el 45% y el 86%.
- Hidrógeno: Se encuentra en un rango de entre el 4% y el 6%.
- Oxígeno: Constituye aproximadamente entre el 2% y el 15%.
- Nitrógeno y Azufre: Presenta pequeñas cantidades de nitrógeno (alrededor del 1% al 2%) y azufre (hasta el 4%).

*Tabla IV: Composición química Carbón [19]*

Análisis elemental	%p/p	Análisis próximo	%p/p
C	68.54	Humedad	2.93
N	1.63	Material volátil	34.42
O	11.26	Carbono fijo	59.99
H	4.89		
S	1.12	Cenizas	5.59

#### Romerillo

Un material natural de tonalidad gris oscuro, que consiste en una mezcla de grava, limo y arena, se extrae directamente en su composición original y se emplea como agregado para mejorar y estabilizar suelos, así como para reforzar pavimentaciones,

Es comúnmente utilizado como material de relleno superficial y estabilizante debido a su composición química, que es rica en calcio, sílice (SiO<sub>2</sub>) y contiene trióxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), entre otros componentes. Estas características lo clasifican como un material puzolánico, lo que lo posiciona como una posible alternativa para el reemplazo parcial de un estabilizante de la subrasante.



*Ilustración 4: Elaboración propia-Muestra de Romerillo*

### **Fluorescencia de Rayos X (FRX)**

Se trata de un método analítico empleado para obtener la composición elemental de una muestra, permitiendo la identificación y cuantificación de los diferentes elementos en ella. Esta técnica es no destructiva permitiendo analizar las muestras sin dañarlas, permite obtener resultados en poco tiempo comparado a otros métodos analíticos, asimismo, esta técnica puede ensayar muestras en estado sólido, líquidos o en polvo, lo que lo hace un ensayo versátil. El principio del ensayo es la excitación de una muestra por medio de Rayos X, en la emisión de fluorescencia y la detección por medio de un detector que mide la intensidad y la energía de la radiación fluorescente; lo cual nos permite la identificación y cuantificación de los compuestos. [23]

### **Romerillo**

Actualmente, la recolección del Romerillo se realiza en el área de la Cantera Garate, ubicada en Rioja. Este material se recolecta con pala y se almacena en bolsas herméticas. Aún se extrae en esta zona del departamento de San Martín, y las áreas circundantes están disponibles para su uso en diversos proyectos de ingeniería. Este material fue elegido como agente estabilizador debido a su composición rica en sílice, fósforo y calcio, componentes importantes para estabilizar suelos. Por su alto contenido de  $\text{SiO}_2$ , pentóxido de fósforo y óxido de calcio, este agregado se clasifica como un material puzolánico (Tipo F), por lo que puede presentarse como una nueva opción para el reemplazo parcial del cemento, ya que ayuda a la cohesión entre partículas y aumenta la capacidad de carga de un suelo (CBR).

Tabla V: Resultados de FRX del Romerillo

COMPOSICIÓN QUÍMICA	ESTUDIO (1)	ESTUDIO (2)	ESTUDIO (3)	ESTUDIO (4)
DIOXIDO DE SILICIO (SiO <sub>2</sub> )	5.67	5.45	5.23	5.01
OXIDO DE CALCIO (CaO)	7.64	8.10	8.56	9.02
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.19	6.08	5.97	5.86
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.08	2.90	2.72	2.54
OXIDO DE POTASIO (K <sub>2</sub> O)	9.38	7.27	5.16	3.05
OXIDO DE MAGNESIO (MgO)	2.64	2.33	2.02	1.71
PENTOXIDO DE FOSFORO (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	12.03	11.89	11.75	11.61
OXIDO DE COBRE (CuO)	0.27	0.20	0.13	0.06
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO <sub>3</sub> )	0.11	0.12	0.13	0.14
OXIDO DE ZINC (ZnO)	3.84	3.73	3.62	3.51
OXIDO DE MANGANESO (MnO)	1.67	1.50	1.33	1.16

Fuente: Elaboración propia

### Carbón Molido

En Perú, aproximadamente el 20% de los hogares reconocen que los biocombustibles sólidos pueden originarse a partir de residuos generados por actividades agroindustriales o el procesamiento de la madera. Estos materiales se transforman mediante métodos térmicos o químicos, como la combustión. Un ejemplo de esto es el carbón, que se produce quemando troncos.

El carbón molido es un material granular producido al triturar carbón natural hasta obtener partículas finas. Este proceso aumenta su área superficial específica, lo que mejora su reactividad y lo hace óptimo para aplicarlo en proyectos industriales y de ingeniería civil. En la estabilización de suelos, el carbón molido se usa como aditivo aumentar las propiedades físico-mecánicas del terreno, como capacidad y resistencia. [19]

En cuanto al carbón molido, se identificaron concentraciones significativas de carbono (66,68%), sílice (12,07%) y óxido de fósforo (6,84%).

La composición del carbón molido refleja un alto contenido de carbono, aunque este es algo menor en comparación con ciertos tipos de carbón activado, que pueden contener entre un 75% y 80% de carbono. Además, destaca la presencia significativa de sílice y óxidos de fósforo, componentes que pueden influir positivamente en sus propiedades como aditivos para el suelo y en otras aplicaciones industriales. Los minerales presentes en el carbón molido favorecen la ocurrencia de reacciones puzolánicas, las cuales contribuyen a aumentar la cohesión y la resistencia del suelo cuando se utiliza este material como aditivo en mezclas estabilizantes.

Tabla VI: Resultados de FXR del Carbón Molido

COMPOSICIÓN QUÍMICA	ESTUDIO (1)	ESTUDIO (2)	ESTUDIO (3)	ESTUDIO (4)
DIOXIDO DE SILICIO (SiO <sub>2</sub> )	12.07	12.11	12.15	12.19
CARBONO (C)	61.19	63.02	64.85	66.68
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.68	1.63	1.58	1.53
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.16	0.14	0.12	0.10
OXIDO DE POTASIO (K <sub>2</sub> O)	3.67	3.62	3.57	3.52
OXIDO DE MAGNESIO (MgO)	0.43	0.40	0.37	0.34
PENTOXIDO DE FOSFORO (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	6.84	6.81	6.78	6.75
OXIDO DE COBRE (CuO)	0.08	0.07	0.06	0.05
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO <sub>3</sub> )	2.48	2.42	2.36	2.30
OXIDO DE ZINC (ZnO)	0.06	0.05	0.04	0.03
OXIDO DE MANGANESO (MnO)	1.31	1.33	1.35	1.37

Fuente: Elaboración propia

### Ensayos de Laboratorio

#### ❖ Contenido de Humedad NTP 339.127

La humedad del suelo se define como % en peso de agua contenida en una muestra, en relación con partículas sólidas que la componen. [15]

#### Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Bandeja metálica
- Horno con capacidad calorífica de 110° ± 5°

#### Procedimiento:

Definimos la muestra (masa) con una exactitud porcentual de 0.1. Luego, colocamos la muestra al horno estufa a 110°C. Se vuelve a pesar la muestra una vez que ha sido secada para calcular el contenido de humedad, determinando así resta entre la masa inicial húmeda y la masa después del secado.

$$C. Humedad = \frac{W. Humedo - W. Seco}{W. Seco} * 100$$

### ❖ Granulometría por tamizado MTC E 107

El objetivo es cuantificar como se distribuye las partículas presentes en una mezcla, clasificándolas según su tamaño. Este procedimiento nos indica como determinar los porcentajes de suelo que pasan por cada tamiz, comprendidos entre 4.75 mm y el tamiz número 74 (equivalente al N° 200). norma ASTM D 422. [20]

*Tabla VII: Tamaño de Partículas*

TIPO DE MATERIAL	TAMAÑO DE LAS PARTICULAS
Grava	Entre 75mm y 2mm
Arena	A. Gruesa: Entre 2mm y 0.2mm
	A. Fina: 0.2mm y 0.05mm
Limo	Entre 0.05mm y 0.005 mm
Arcilla	> a 0.005mm

### Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Bandeja metálica
- Horno con capacidad calorífica de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Brocha de limpieza
- Tamices

*Tabla VIII: Tamices para granulometría según MTC*

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

### Procedimiento:

Se procede a secar un mínimo de 300 gramos de muestra durante 24 horas en horno. Posteriormente, la muestra seca se lava utilizando el tamiz número 200, recolectando todo el material retenido en dicho tamiz. Finalmente, la fracción retenida se seca nuevamente en horno por un período de 24 horas. Tamizamos la muestra seca retenida por los tamices N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N°50, N°100 Y N° 200, anotamos los retenido y realizamos la curva granulométrica teniendo en cuenta lo retenido en cada tamiz.

### ❖ Gravedad específica MTC E 113

Mide la densidad de una muestra comparando con la densidad del agua.

#### **Materiales:**

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Picnómetro con capacidad de 250ml
- Válvula o bomba de vacíos
- Agua destilada
- Termómetro

#### **Procedimiento:**

Pesar 40gr de muestra de muestra seca y tamizada por la N° 4. En primer lugar, se pesa el picnómetro de 250 ml vacío. Luego, se llenará con agua destilada hasta la marca indicada y se anota el peso del picnómetro lleno. Posteriormente, se retira una cantidad de agua suficiente para permitir la adición de la muestra. Una vez colocado la muestra volvemos a llenar con agua destilada hasta la línea del picnómetro y volvemos a pesar. Una vez tengamos el picnómetro con suelo y agua destilada llevamos a la bomba de vacíos para poder eliminar los vacíos. Por último, pesamos nuevamente el picnómetro con suelo y agua destilada sin vacíos y realizamos el cálculo de la gravedad específica.

*Datos:*

*Peso de muestra suelo seca =  $P_s$*

*Peso de fiola + agua =  $P_a$*

*Peso de fiola + agua + muestra de suelo =  $P_{as}$*

$$\text{Gravedad específica} = \frac{P_s}{((P_s) + (P_a) - (P_{as}))} * 100$$

### ❖ Granulometría por hidrómetro o por sedimentación MTC E 109

Se basa en la ley de Stokes, este ensayo relaciona el tamaño de una partícula y su velocidad de sedimentación en un fluido. La finalidad de realizar este ensayo es para la determinación del porcentaje que pasa del tamiz 200. La muestra utilizada para este ensayo será aquella que pase por el tamiz N° 10.

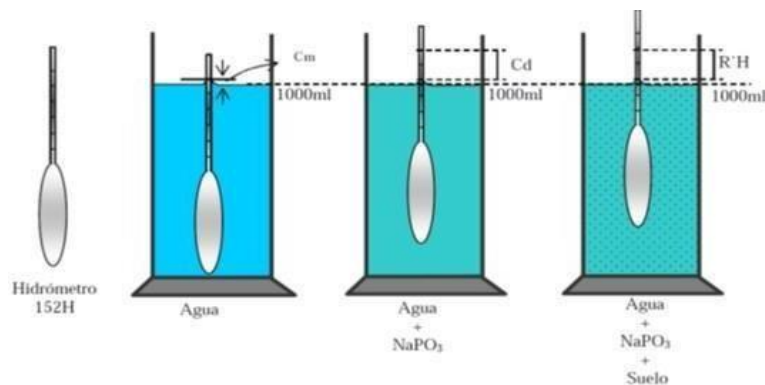


Ilustración 5: Granulometría por Hidrómetro o por Sedimentación

### Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Probeta graduada de vidrio de 1L
- Agua destilada
- Hexametáfosfato de sodio
- Tamiz N° 10 y N°200
- Hidrómetro
- Horno con capacidad calorífica de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Frasco de vidrio

### Procedimiento:

Obtener una muestra de suelo seca de 50gr tamizada por la malla N° 10. Luego añadimos 5gr de hexametáfosfato de sodio a la muestra de suelo, y disolvemos en agua 250ml de agua en un frasco de vidrio y agitamos por 5 minutos. Esperamos 24hrs para que el reactivo disperse las partículas del suelo. Pasado el tiempo, vaciamos el contenido del frasco a la probeta de vidrio, y completamos con agua destilada hasta 1L. Tomamos las lecturas con ayuda del hidrómetro y un cronometro en los siguientes tiempos: 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos, 1, 2, 4, 6, 12 y 24 horas. Una vez tomada la última medida de 24hrs, lavamos la muestra contenida en la jarra de vidrio por el tamiz N° 200, vaciamos en un recipiente metálico y lo introducimos en el horno para que seque. Una vez seco, pesamos el contenido que nos quedó y procesamos los datos obtenidos.

## ❖ Límites de atterberg NTP 339.129

### ➤ Límite líquido

Es el agua en porcentaje que necesita un suelo para encontrarse entre un estado plástico y líquido. [20]

#### **Materiales:**

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Recipientes metálicos pequeños
- Horno con capacidad calorífica de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Copa de Casagrande
- Ranurador
- Agua destilada

#### **Procedimiento:**

Obtener una muestra seca de 150 - 200 gramos tamizado por la N°40; luego, con el uso de una espátula, mezclamos el suelo con agua desmineralizada o destilada en un recipiente plástico y tapamos con una bolsa plástica evitando perder humedad. Dejamos reposar por 24 horas para que la muestra se sature por completo. Una vez saturado por completo, utilizamos una copa de Casagrande para realizar el método multipunto.

### ➤ Límite plástico

Es el agua en porcentaje que necesitará un suelo para encontrarse entre un estado plástico y semisólido. [20]

#### **Materiales:**

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Recipientes metálicos pequeños
- Horno con capacidad calorífica de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$

#### **Procedimiento:**

Con la muestra saturada y utilizada en el límite líquido realizamos bastoncitos del grosor de 3mm, tomaremos como muestra valida de bastones para este ensayo aquellos que presenten fisuración y puedan mantenerse firmes si son sostenidos con las yemas de los dedos a una distancia de 1/3 del cuerpo del bastón.

### ➤ Índice de plasticidad

Es la diferencia entre límite líquido y plástico.

*Tabla IX: Índice de Plasticidad-Clasificación*

INDICE DE PLASTICIDAD	Indicador	Característica
$D > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$7 < IP \leq 20$	Media	Suelos arcillosos
$< 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
0	No Plástico (NP)	Suelos sin presencia de arcilla

#### ❖ Proctor Modificado

Es la eliminación de vacíos de un suelo mediante la inducción de una energía de compactación inducida. [20]

#### **Materiales:**

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Balanza para kg.
- Recipientes metálicos pequeños
- Horno con capacidad calorífica de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Molde para Proctor de 4"
- Enrasador o regla metálica

#### **Procedimiento:**

Seleccionamos 4 bolsas de 2.5kg de muestra tamizada por la N° 4; luego, saturamos en distintos porcentajes de humedad teniendo en cuenta el Índice Plástico del suelo de estudio, estos porcentajes de humedad deben ser incrementos consecutivos entre 2% y 4%; es decir, empezamos con 6% para una muestra, luego un 8% para la segunda muestra y así hasta llegar a 12% para la última muestra. A continuación, escogemos un molde de 3" en donde se compactará cada muestra, se calcula el volumen y peso del molde. La muestra se divide en cinco partes iguales mediante, con el fin de obtener una muestra más homogénea en cada porción. Además, se extrae una pequeña muestra representativa para determinar el contenido de humedad de la muestra saturada. Posteriormente, se coloca la 1° capa en el molde y se compacta aplicando 25 golpes por capa, repitiendo este proceso hasta completar las 5 capas requeridas para llenar el molde. Enrasamos lo excedente y pesamos la muestra de tierra sumada el peso del molde.

$$W. Suelo Humedo Compactado = (W. Suelo + W. Molde) - W. Molde$$

$$Máxima Densidad Húmeda = W. Suelo Humedo \frac{Compactado}{Volumen de Molde}$$

$$C. Humedad = \frac{W. Humedo - W. Seco}{W. Seco} * 100$$

$$Máxima Densidad Seca = \frac{Máxima Densidad Húmeda}{C. Humedad}$$

#### ❖ California Bearing Ratio (CBR)

Es la resistencia de un suelo a un 95% de M.D.S. a una penetración de carga. [15]

En la elaboración de carreteras, es la capacidad de resistencia de la subrasante que se evalúa mediante un parámetro conocido como Índice de Soporte de California (CBR) Durante este procedimiento, se prepara el suelo en laboratorio conforme a condiciones precisas de densidad y humedad, aunque también es posible realizar pruebas similares utilizando muestras inalteradas extraídas directamente del lugar de interés. [22]

Tabla X: Categorías según el MTC – Subrasantes

Categoría de Subrasante	CBR
Inadecuada	<3%
Insuficiente	3%<CBR<6%
Regular	6%<CBR<10%
Buena	10%<CBR<20%
Muy Buena	20%<CBR<30%
Excelente	>30%

#### Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Balanza para kg.
- Recipientes metálicos pequeños
- Horno con capacidad calorífica de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Molde para CBR
- Enrasador o regla metálica
- Disco espaciador metálico
- Pisón de compactación
- Pesas metálicas para CBR
- Medidor de expansión

**Procedimiento:**

El procedimiento es parecido al del Proctor Modificado, pero esta vez realizaremos 3 moldes para obtener un solo resultado de CBR, cada uno de estos moldes serán compactados en 56 golpes o 55 golpes, 25 golpes y 15 golpes o 12 golpes respectivamente y según la norma, se usará un papel filtro cada extremo del molde antes de compactar para evitar la pérdida de finos. Una vez compactados serán sumergidos en una poza de curado y estarán ahí por 4 días como mínimo, cada 24hrs se deberá tomar la medida de la expansión del suelo, si el suelo sigue expandiéndose se deberá extender el proceso de curado. Después del proceso de curado, se procede a ensayar los moldes utilizando un pistón de penetración. Durante la prueba, se registran las lecturas correspondientes a la profundidad de penetración del pistón en función del tiempo, con el fin de evaluar la resistencia del suelo compactado.

**Materiales y métodos****Diseño de investigación****Tipo de investigación**

Este estudio se considera de tipo experimental, ya que se manipulará deliberará las variables independientes con el objetivo de analizar su influencia sobre las variables dependientes. En este contexto, las variables independientes son el compuesto de Romerillo y el carbón molido. Se diseñarán y ejecutarán una serie de experimentos controlados para determinar cómo estas variables pueden afectar la estabilización de la subrasante. La manipulación deliberada de estas variables permitirá establecer relaciones causales, proporcionando una comprensión detallada de los procesos involucrados y validando hipótesis específicas.

La presente investigación es de carácter aplicado, dado que busca generar conocimientos prácticos y desarrollar tecnologías que puedan ser implementadas en la estabilización de suelos. El uso del compuesto de Romerillo junto con carbón molido se orienta a ofrecer soluciones efectivas y viables para mejorar las propiedades mecánicas y físicas del suelo, contribuyendo así al mejoramiento de la capacidad portante y durabilidad en proyectos civiles.

**Hipótesis**

La adición del compuesto de Romerillo y Carbón molido mejora los suelos arcillosos para subrasantes.

## Variables y operacionalización

### Variable independiente

\* Compuesto o mezcla de Romerillo y Carbón molido.

### Variable dependiente

\* Propiedades físicas del suelo

\* Propiedades mecánicas del suelo

*Tabla XI: Operacionalización de Variables*

Variables			Indicadores - Ensayos
Tipo	Descripción	Dimensiones	
INDEPENDIENTE	Compuesto de Romerillo y Carbón molido	Propiedades	Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X
DEPENDIENTE	Propiedades físicas del suelo	Límite Líquido	NTP 339.129
		Límite Plástico	NTP 339.130
		Granulometría por tamizado	NTP 339.128
		Contenido de Humedad	NTP 339.127
		Gravedad específica	NTP 339.141
	Propiedades mecánicas del suelo	Proctor	NTP 339.141
		CBR	NTP 339.145

## Población, muestra y muestreo

### Población

Suelos a nivel subrasante de tipo arcillosos para que posteriormente se adicione el compuesto de Romerillo y Carbón molido.

### Muestra

Son dichos suelos que se obtendrán en el tramo del caserío Mashuyacu, Rioja, departamento de San Martín. A los cuales se les realizó ensayos de laboratorio, con el fin de entender el comportamiento de los suelos arcillosos adicionando el compuesto romerillo y carbón molido.

Asimismo, la muestra también se encuentra conformada por el carbón generado por la combustión de leña de tornillo de las viviendas del caserío Mashuyacu y de la ciudad de Rioja, San Martín y el romerillo se encuentra extraído en Soritor de la cantera Gárate, Rioja.

## Muestreo

El muestreo efectuado corresponde a un tipo no probabilístico por conveniencia, conforme a lo estipulado en la norma CE.010 de Pavimentos Urbanos. Según esta normativa, la profundidad mínima para la exploración del suelo debe ser de 1.50 metros, y se requiere un mínimo de cinco puntos de muestreo para garantizar una adecuada representatividad del terreno.

Para fines prácticos de la investigación se tuvo en cuenta usar abreviaturas tanto para el suelo natural al cual nos referiremos como SN en adelante, para el romerillo R y para el carbón molido CM nos referiremos como RCM en adelante.

Según el Manual de Carreteras aprobado por el MTC del Perú, la frecuencia recomendada para la realización de calicatas en proyectos viales varía según el tipo de vía y las características del terreno. Para carreteras rurales o interurbanas, se sugiere excavar una calicata cada 500 metros, mientras que en vías urbanas la distancia recomendada es de una calicata cada 100 metros. [17]

*Tabla XII: Frecuencia de Calicatas*

Tipo de Terreno o Proyecto	Frecuencia Recomendada	Observaciones
Vía urbana	Cada 100 metros	Mayor densidad por alta variabilidad del suelo y requerimientos estructurales.
Vía rural o carretera interurbana	Cada 500 metros	Aplicable en condiciones geológicas normales y sin cambios abruptos.
Terreno homogéneo	Mayor a 500 metros (variable)	Puede espaciarse más si estudios preliminares lo justifican.
Terreno con condiciones variables/inestables	Menor a 500 metros (variable)	Se recomienda aumentar la densidad para caracterizar mejor los cambios geotécnicos.

El Manual para el Diseño de Caminos Pavimentados de Bajo Volumen de Tránsito, aprobado mediante la Resolución Ministerial N.º 305-2008-MTC/02, lo define como camino de bajo volumen de tránsito aquel que presenta un flujo vehicular diario igual o inferior a 350 vehículos por día. Este tipo de vías suele encontrarse en zonas rurales, de acceso o en áreas con baja densidad poblacional y limitada actividad vehicular. [24]

Nos demanda realizar 12 calicatas distribuidas a lo largo del tramo, pero a fines de la investigación se realizarán 5 calicatas las cuales se distribuirán a distancias iguales a lo largo

de la extensión de la carretera de acuerdo a convivencia del autor, dando realce a los siguientes ensayos descritos solamente con las 3 calicatas más desfavorables, con la finalidad de evaluar el comportamiento del compuesto RCM en los distintos porcentajes: 6%, 10% y 14%, los cuales estarán conformados en una combinación de 50/50, es decir, 3% para Romerillo y 3% de Carbón molido, y así sucesivamente con los 2 porcentajes de adición.

El presente estudio se distingue por su carácter experimental y no incluye una aplicación directa en proyectos de infraestructura vial.

El muestreo está compuesto por un total de 145 especímenes, distribuidos en dos grupos: 46 especímenes corresponden a la muestra patrón, mientras que 99 especímenes forman parte del grupo experimental, que incluye las diferentes combinaciones de aditivos a evaluar.

- **Contenido de Humedad (CH):**

Se usarán 3 muestras por cada calicata.

*Tabla XIII: Muestras de Contenido de Humedad*

ENSAYO	Suelo natural
Contenido de Humedad	9
<b>TOTAL</b>	<b>9</b>

- **Granulometría por Tamizado:**

Para las muestras de granulometría por tamizado se usarán 1 muestra por cada por cada calicata y romerillo.

*Tabla XIV: Muestras Granulometría por tamizado*

Granulometría por tamizado	Cant
Suelo Natural	3
Romerillo	1
<b>TOTAL</b>	<b>4</b>

- **Gravedad Específica:**

Se usarán 1 muestra por cada calicata romerillo y carbón molido.

*Tabla XV: Muestras Gravedad Específica*

Propiedad Resistencia	Suelo natural
Gravedad Específica	3
<b>TOTAL</b>	

- **Límites de consistencia:**

En los ensayos de límites de atterberg, granulometría por tamizado, contenido de humedad y gravedad específica se usarán 1 muestra para las 4 adiciones (0%, 6%, 10% y 14%) y para las 3 calicatas por tanto cada ensayo contará 12 muestras.

*Tabla XVI: Muestras de Límites de Consistencia*

Propiedad Resistencia	Suelo natural	Suelo natural con adición					
		6%		10%		14%	
		3% de Romerillo	3% de Carbón molido	5% de Romerillo	5% de Carbón molido	7% de Romerillo	7% de Carbón molido
Límite Líquido	3	3		3		3	
<b>TOTAL</b>		<b>12</b>					

Propiedad Resistencia	Suelo natural	Suelo natural con adición					
		6%		10%		14%	
		3% de Romerillo	3% de Carbón molido	5% de Romerillo	5% de Carbón molido	7% de Romerillo	7% de Carbón molido
Límite plástico	3	3		3		3	
<b>TOTAL</b>		<b>12</b>					

- **Proctor Modificado:**

Para las muestras se usarán 3 muestra para las 4 adiciones (0%, 6%, 10% y 14%) y para las 3 calicatas por tanto cada ensayo contará 36 muestras.

*Tabla XVII: Muestras para Proctor*

Propiedad Resistencia	Suelo natural	Suelo natural con adición					
		6%		10%		14%	
		3% de Romerillo	3% de Carbón molido	5% de Romerillo	5% de Carbón molido	7% de Romerillo	7% de Carbón molido
Proctor	9	9		9		9	
<b>TOTAL</b>		<b>36</b>					

- **CBR:**

Para las muestras del ensayo de CBR se usarán 5 muestras para las 4 adiciones (0%, 6%, 10% y 14%) y para las 3 calicatas por tanto cada ensayo contará 60 muestras.

*Tabla XVIII: Muestras para CBR*

Propiedad Resistencia	Suelo natural	Suelo natural con adición					
		6%		8%		10%	
		3% de Romerillo	3% de Carbón molido	4% de Romerillo	4% de Carbón molido	5% de Romerillo	5% de Carbón molido
CBR	15	15		15		15	
<b>TOTAL</b>		<b>60</b>					

El ensayo de CBR es fundamental para determinar cuan efectivo es la adición de cenizas como estabilizador en suelos arcillosos, ya que permite evaluar la mejora en la capacidad portante del suelo. Se usará una fórmula estadística para determinar las muestras que necesitaremos.

$$n = \frac{Z^2 pq}{e^2}$$

Donde:

*p*: Proporción poblacional que presenta cierta característica.

*q*: Proporción poblacional que no presenta la característica.

*e*: Máximo error de estimación de *p*.

*Z*: Valor relacionado al nivel de confianza.

### **Criterios de selección**

Para estabilizar la subrasante, se considerarán 3 porcentajes diferentes de adición, Primero, se realizarán 5 calicatas en el tramo caserío Mashuyacu empalme Rioja, de las cuales se seleccionarán 3 con el fin de estabilizarlas.

El compuesto de Romerillo y el carbón molido serán procesados adecuadamente. Ambos materiales serán sometidos a un proceso de trituración y molienda para obtener partículas más pequeñas. Este tratamiento permitirá una mejor integración de los materiales en la subrasante, mejorando sus propiedades mecánicas y de estabilidad.

La ubicación de cada calicata en el área estudiada se determinó siguiendo el criterio del investigador.

*Para determinar la zona en dónde se realizó las calicatas, nos basamos de lo informado por INDECI y la Municipalidad Provincial de Rioja, donde refiere que las zonas que se ubican en la carretera hacia el caserío Mashuyacu presentan suelo arcilloso.*

Dado que el romerillo presenta un alto contenido de Fósforo, Potasio, Sílice, óxido de calcio (CaO), compuesto presente en un material muy utilizado como agente estabilizante, la cal. Por otro lado, el carbón molido presenta un alto contenido de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), carbono, entre otros elementos, compuesto presente en otro material muy utilizado como agente estabilizante. Al tener esta mezcla en propiedades puzolánicas podrían de este modo mejorar la resistencia del suelo.

Las dosificaciones de compuesto de romerillo y carbón molido empleadas fueron del 6%, 10% y 14% en peso seco del suelo, considerando granulometrías menores a 0.075 mm (tamiz N° 200). Estas proporciones se seleccionaron tomando como referencia los resultados y recomendaciones obtenidos en investigaciones previas sobre estabilización de suelos con estos materiales. En donde se evidencia que el porcentaje óptimo promedio en términos de resistencia es 10% de adición en peso seco del suelo. En esta investigación se seleccionaron

tres dosificaciones del compuesto de romerillo y carbón molido, correspondientes al 6%, 10% y 14% en peso seco del suelo, con partículas menores a 0.075 mm (tamiz N° 200). Estos porcentajes fueron propuestos para evaluar su efecto como agentes estabilizadores y así determinar la dosis óptima que permita mejorar las propiedades del suelo bajo estudio, siguiendo criterios establecidos en investigaciones previas relacionadas con estabilización de suelos mediante aditivos orgánicos e inorgánicos. Debido a qué, en los antecedentes hay mucha discrepancia entre la granulometría de ambos elementos a utilizar, se trabajará con una gradación < 0.075 mm (N° 200).

### **Procedimiento**

El desarrollo de esta investigación seguirá un cronograma detallado para alcanzar los resultados esperados. El proceso comenzará con una fase de planificación, donde se recopilará información relevante mediante la revisión de diversas fuentes bibliográficas, antecedentes de tesis y artículos de investigación relacionados con la estabilización de subrasante. En esta fase preliminar, el enfoque estará en construir una fundamentación teórica robusta y adquirir un conocimiento detallado sobre los materiales y procedimientos que serán empleados en el estudio.

En la siguiente etapa, se procederá a la obtención del compuesto de Romerillo y el carbón molido. Además, se llevarán a cabo las calicatas en el terreno seleccionado, eligiendo aquellas con las peores condiciones para su posterior estabilización. Una vez recolectados los materiales y preparados los sitios de estudio, se avanzará a la fase de ejecución.

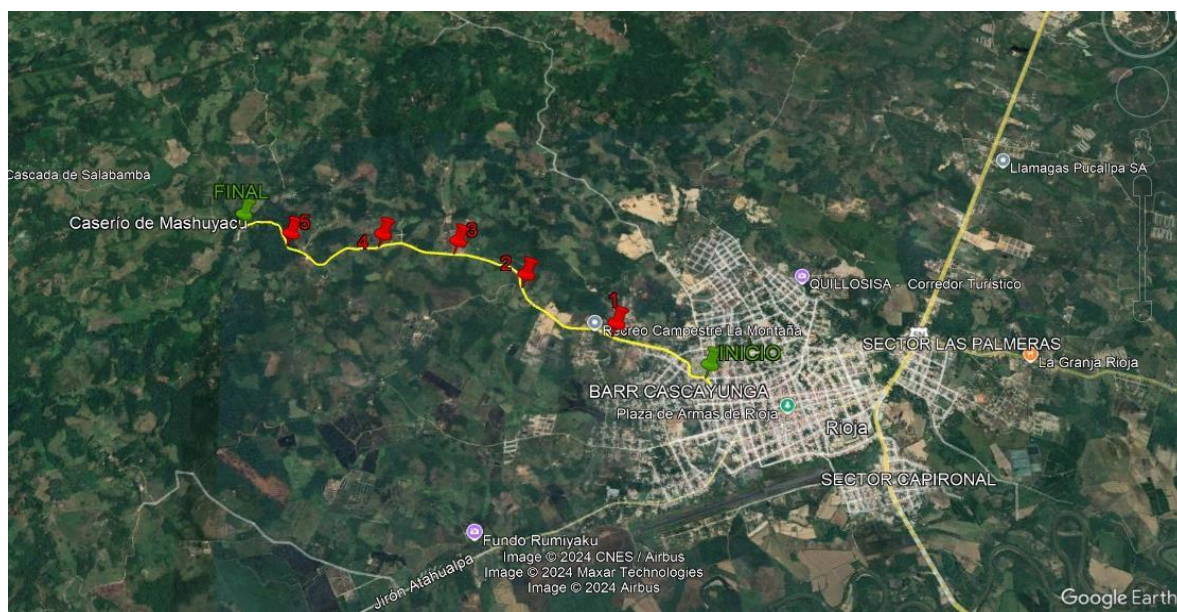
Durante la etapa de ejecución, se realizarán diversas pruebas conforme a las normativas vigentes, con el propósito de evaluar la efectividad de la mezcla de Romerillo y carbón molido en la estabilización de la subrasante. Estas pruebas permitirán determinar la mejora en las propiedades mecánicas del suelo, especialmente su capacidad de soporte, siguiendo métodos reconocidos como el ensayo CBR y las especificaciones establecidas por organismos técnicos.

Finalmente, se llevará un registro de todos los procesos y resultados obtenidos en cada ensayo lo cual nos permitirá una comparación de los distintos porcentajes utilizados, y así poder determinar cuál es el óptimo para la estabilización de la subrasante. Los datos recopilados serán comparados y redactados para las conclusiones y recomendaciones del estudio.

## 1. Material en estado natural

### 1.1. Suelo arcilloso

Se usó un suelo cohesivo proveniente de la carretera hacia el caserío Mashuyacu, Rioja; entre las siguientes coordenadas presentadas en UTM. Las muestras de suelo recolectadas presentaban un material de tonalidad beige claro, mientras que la calicata exhibía un color gris oscuro. La textura del suelo era suave y mostraba una plasticidad media. Obtenidas mediante la excavación de tres (05) calicatas de 1.50 metros de profundidad, retirándose los 0.20 metros de la parte superior se retiró una capa de 20cm para evitar contaminantes.



*Ilustración 6: Localización de Calicatas en la carretera Mashuyacu*

*Tabla XIX: Coordenadas de Calicatas*

CALICATA 01:	6° 4'36.71"S - 77° 10'32.44"O
CALICATA 02:	6° 5'5.06"S - 77° 10'51.93"O
CALICATA 03:	6° 5'27.07"S - 77° 11'5.60"O
CALICATA 04:	6° 5'51.99"S - 77° 11'9.83"O
CALICATA 05:	6° 6'22.53"S - 77° 11'12.18"O

*Tabla XX: Coordenadas Calicatas (18M-UTM)*

CALICATA 01:	259199.331 E - 9327821.394 N
CALICATA 02:	258637.182 E - 9326953.181 N
CALICATA 03:	258154.319 E - 9326063.376 N
CALICATA 04:	258137.152 E - 9325013.861 N
CALICATA 05:	257691.188 E - 9324397.052 N

A continuación, se observa el lugar exacto donde se realizó las calicatas, el cual fue una zona descampada, donde no se encontró: ninguna tubería de agua potable o de desagüe.



*Ilustración 7: Extracción de muestra, calicata C-01*



*Ilustración 8: Extracción de muestra, calicata C-02*



*Ilustración 9: Extracción de muestra, calicata C-03*



*Ilustración 10: Extracción de muestra, C-04*



*Ilustración 11: Extracción de muestra, calicata C-05*

## **2. Romerillo (Cantera Gárate)**

La recolección del Romerillo en la Cantera Gárate, ubicada en Rioja. El cual se recolectó con palana y guardados en bolsas herméticas. Dicho material se mantiene extraído en dicha zona del departamento de San Martín, teniendo a disposición para su aprovechamiento para distintos proyectos. Se escogió dicho material como agente estabilizador debido a su composición rico en sílice, fósforo y calcio unos componentes importantes en la estabilización de suelos.

Adjunto dicha solicitud a la Cantera Gárate, como solicitante para la extracción de dicho material llamado Romerillo.



*Ilustración 12: Muestra de Romerillo*

### Consideraciones éticas

- La presente investigación es autentica debido a que no se ha encontrado estudios que usen la misma combinación de material usados en el proyecto.
- Los ensayos y resultados se han presentado de manera íntegra y fiel, sin modificaciones ni manipulaciones por parte del investigador. Asimismo, se garantiza la originalidad del trabajo, sin incurrir en plagio.
- Además, se han tomado las consideraciones éticas del Código Deontológico del CIP.
- Asimismo, los antecedentes que fueron tomados como referencia para la presente investigación están citados.

Tabla XXI: Matriz de Consistencia

Evaluar la influencia del compuesto Romerillo y Carbón molido para mejorar las propiedades mecánicas de la subrasante del tramo: caserío Mashuyacu empalme Rioja							
Planteamiento del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables			Indicadores - Ensayos	Metodología
			Tipo	Descripción	Dimensiones		
¿Cómo influye el compuesto de Romerillo y Carbón molido como estabilizadores de suelos granulares para subrasantes?	<b>Objetivo General:</b> Evaluar la influencia del compuesto Romerillo y Carbón molido para mejorar las propiedades mecánicas de la subrasante del tramo: caserío Mashuyacu empalme Rioja.	La adición del compuesto de Romerillo y Carbón molido mejora los suelos granulares para subrasante.	Independiente	Compuesto de Romerillo y Carbón molido	Propiedades	Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X	<b>Tipo de Investigación:</b> Experimental y Aplicada
	Dependiente					Propiedades físicas del suelo	
			Límite Plástico	NTP 339.130			
			Granulometría por tamizado y sedimentación	NTP 339.128			
			Contenido de Humedad	NTP 339.127			
			Gravedad específica	NTP 339.141			
	Propiedades mecánicas del suelo		Proctor	NTP 339.141			
CBR		NTP 339.145					
<b>Objetivos Específicos:</b> Determinar la composición química del romerillo y carbón molido mediante Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X.	Establecer la dosificación adecuada y más eficiente del compuesto romerillo-carbón molido conforme a la variación de los suelos granulares y resistencia mecánica reflejados en sus propiedades.	Clasificar el suelo de acuerdo a las normas establecidas SUCS y AASHTO.	Determinar el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos granulares mediante la mezcla de romerillo y carbón molido.	Estimar el costo del mejoramiento en las propiedades mecánicas de la subrasante del tramo: Caserío Mashuyacu empalme Rioja (km #) correspondiente			

## Resultados y Discusiones

### Procesamiento de datos

Para el desarrollo y análisis de los ensayos propuestos en esta investigación se usó Excel. En este programa se diseñaron los formatos específicos para cada prueba, permitiendo la elaboración y el análisis de gráficos que representan los resultados obtenidos en cada ensayo. Esta metodología facilitó la organización de los datos y la visualización clara de los comportamientos del suelo bajo las diferentes condiciones evaluadas.

## Resultados

### ❖ Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X

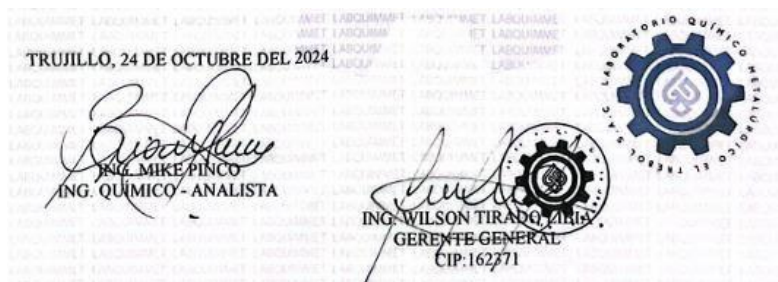
Mediante este método se encontró que la composición química del romerillo (Tabla 22) presenta 12.03% de pentóxido de fósforo, 9.38% de óxido de potasio, 7.64% de óxido de calcio y 5.67% de dióxido de Silicio, siendo los más importantes. A diferencia del carbón molido su composición química (tabla 19), donde por el mismo método, se encontró como predominante al carbono con un 61.19%, dióxido de silicio con un 12.07% y 6.84% de fósforo.

*Tabla XXII: Composición Química del Romerillo*

COMPOSICIÓN QUÍMICA	ESTUDIO (1)
DIOXIDO DE SILICIO (SiO <sub>2</sub> )	5.67
OXIDO DE CALCIO (CaO)	7.64
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.19
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.08
OXIDO DE POTASIO (K <sub>2</sub> O)	9.38
OXIDO DE MAGNESIO (MgO)	2.64
PENTOXIDO DE FOSFORO (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	12.03
OXIDO DE COBRE (CuO)	0.27
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO <sub>3</sub> )	0.11
OXIDO DE ZINC (ZnO)	3.84
OXIDO DE MANGANESO (MnO)	1.67

*Tabla XXIII: Composición Química del Carbón Molido*

COMPOSICIÓN QUÍMICA	ESTUDIO (1)
DIOXIDO DE SILICIO (SiO <sub>2</sub> )	12.07
CARBONO (C)	61.19
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.68
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.16
OXIDO DE POTASIO (K <sub>2</sub> O)	3.67
OXIDO DE MAGNESIO (MgO)	0.43
PENTOXIDO DE FOSFORO (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	6.84
OXIDO DE COBRE (CuO)	0.08
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO <sub>3</sub> )	2.48
OXIDO DE ZINC (ZnO)	0.06
OXIDO DE MANGANESO (MnO)	1.31



## ❖ Ensayos Físicos

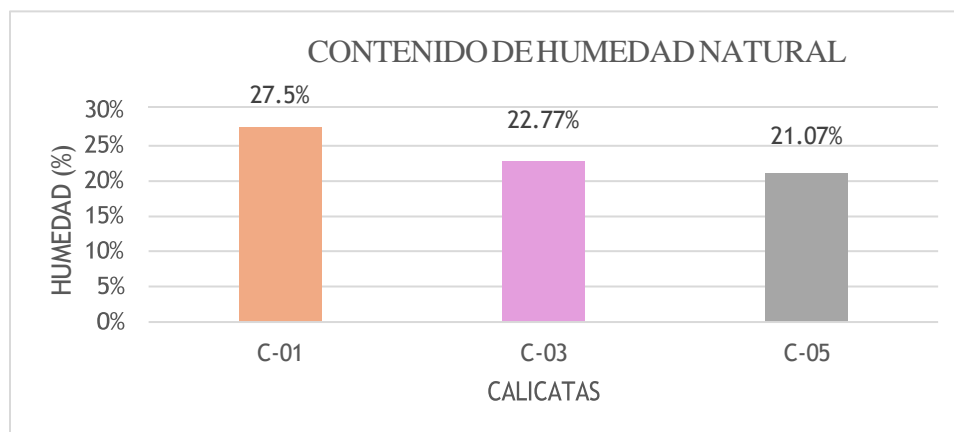
### 1. Contenido de Humedad

El promedio de la humedad natural obtenidas en las 3 calicatas fue: 27.53% C-01; 22.77% C-03, 21.07% C-05, respectivamente. Se tuvo en cuenta la NTP 339.129. Asimismo, es importante resaltar que el presente ensayo no se realizará a las combinaciones de SN+RCM%.

A continuación, se detalla los resultados:

*Tabla XXIV: Contenido de Humedad*

CALICATA	MUESTRA	HUMEDAD (%)	Promedio
C-01	M-01	28.80%	27.53%
	M-02	26.90%	
	M-03	26.90%	
C-03	M-01	24.30%	22.77%
	M-02	24.30%	
	M-02	19.70%	
C-05	M-01	18.80%	21.07%
	M-02	22.90%	
	M-03	21.50%	



*Gráfico 1: Contenido de Humedad*

## 2. Granulometría por Tamizado

El análisis granulométrico mediante tamizado se realizó conforme a lo estipulado en la norma MTC E107. Cabe destacar que este ensayo no se aplicará a las combinaciones de suelo natural con la mezcla de romerillo y carbón molido (SN+RCM%).

El promedio de limos y arcillas obtenidos en la granulometría por tamizado en las 5 calicatas fue: 80.97% (DE:0.64%), 79.50%, 87.63% (DE:2.08%), 91.30% y 89.33% (DE:1.10%) para C-01, C-02, C-03, C-04 y C-05 respectivamente. Para el romerillo obtuvimos: 33.9% Grava, 59.4% arena y 6.7% limos y arcillas.

Los resultados de la granulometría por tamizado de las 5 calicatas son los siguientes:

*Tabla XXV: Distribución Granulométrico C-01*

MUESTRA	Grava (%) 75.00-4.75 mm	Arena (%) 4.75-0.075 mm	Limo/Arcilla (%) <0.075 mm
M-01	0.00%	19.50%	80.50%
M-02	0.00%	19.30%	80.70%
M-03	0.00%	18.30%	81.70%
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.00%</b>	<b>19.03%</b>	<b>80.97%</b>

*Tabla XXVI: Distribución Granulométrico C-02*

<b>Distribución granulométrico</b>			
% Grava	G.G. %	0.0	0.0
	G. F %	0.0	
% Arena	A.G %	0.0	20.5
	A.M %	1.2	
	A.F %	19.3	
% Arcilla y Limo		79.5	79.5
<b>Total</b>			100.0

*Tabla XXVII: Distribución Granulométrico C-03*

MUESTRA	Grava (%) 75.00-4.75 mm	Arena (%) 4.75-0.075 mm	Limo/Arcilla (%) <0.075 mm
M-01	0.00%	13.90%	86.10%
M-02	0.00%	13.20%	86.80%
M-03	0.00%	10.00%	90.00%
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.00%</b>	<b>12.37%</b>	<b>87.63%</b>

Tabla XXVIII: Distribución Granulométrico C-04

<b>Distribución granulométrico</b>			
% Grava	G.G. %	0.0	0.0
	G. F %	0.0	
% Arena	A.G %	0.1	8.7
	A.M %	0.5	
	A.F %	8.1	
% Arcilla y Limo		91.3	91.3
<b>Total</b>			100.0

Tabla XXIX: Distribución Granulométrico C-05

MUESTRA	Grava (%) 75.00-4.75 mm	Arena (%) 4.75-0.075 mm	Limo/Arcilla (%) <0.075 mm
M-01	0.00%	11.90%	88.10%
M-02	0.00%	10.30%	89.70%
M-03	0.30%	9.80%	90.20%
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.10%</b>	<b>10.67%</b>	<b>89.33%</b>

Tabla XXX: Distribución Granulométrico Romerillo

<b>Distribución granulométrico</b>			
% Grava	G.G. %	2.8	33.9
	G. F %	31.1	
% Arena	A.G %	16.5	59.4
	A.M %	19.0	
	A.F %	23.9	
% Arcilla y Limo		6.7	6.7
<b>Total</b>			100.0

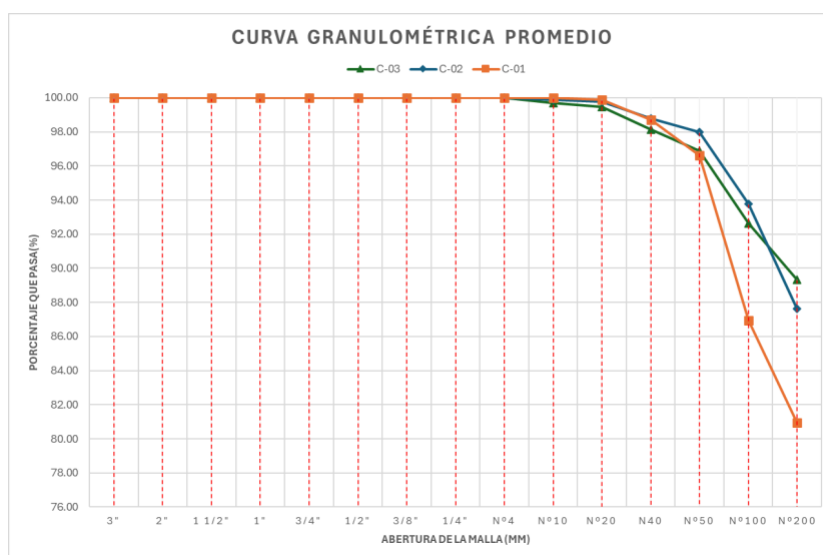


Gráfico 2: Curva Granulométrica de C1, C03 y C-05

### 3. Gravedad Específica

Para la gravedad específica se siguió los lineamientos del MTC E 113. El promedio de las muestras de suelo natural (SN) y romerillo (R) y carbón molido (CM), se pueden apreciar en la tabla 31.

Tabla XXXI: Gravedad Específica

CALICATA	DOSIFICACIÓN	MUESTRA	GRAVEDAD ESPECIFICA
-	ROMERILLO	PROMEDIO	2.72
-	CARBÓN MOLIDO	PROMEDIO	2.61
C-01	100% SUELO NATURAL	PROMEDIO	2.56
C-03	100% SUELO NATURAL	PROMEDIO	2.51
C-05	100% SUELO NATURAL	PROMEDIO	2.54

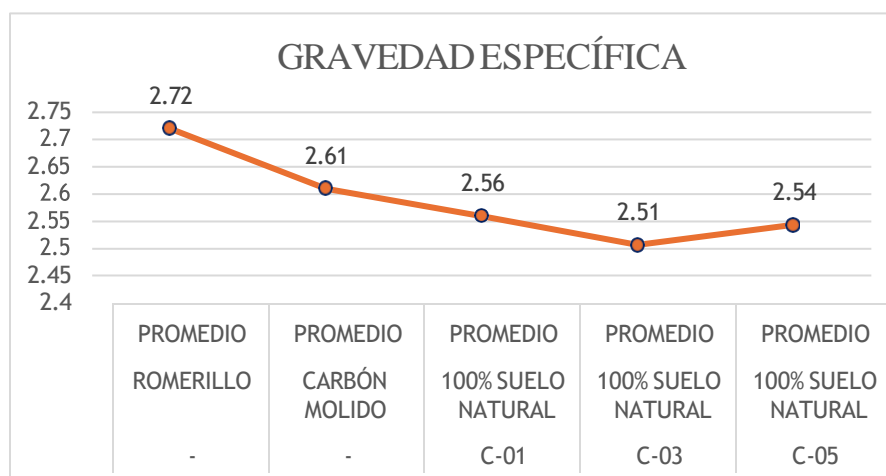


Gráfico 3: Variación en Gravedad Específica

### 4. Límites de Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg se llevó a cabo conforme a las directrices establecidas en la norma NTP 339.129. Se calculó el promedio de tres muestras correspondientes a la muestra patrón y una muestra para cada una de las tres dosificaciones aplicadas en cada calicata. Los resultados muestran una disminución progresiva en el límite líquido (LL), límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP) conforme aumenta el porcentaje de adición del compuesto RCM, tal como se refleja en las tablas siguientes:

Tabla XXXII: Tabla de Límites de Atterberg

CALICATA	DOSIFICACIÓN	LL	LP	IP
C-01	100% SUELO NATURAL	31.22%	17.35%	13.86%
	G4% SUELO NATURAL + 6%RCM	27.40%	17.01%	10.39%
	G0% SUELO NATURAL + 10%RCM	22.76%	14.50%	8.26%
	86% SUELO NATURAL + 14%RCM	24.28%	17.25%	7.03%
C-03	100% SUELO NATURAL	45.00%	17.36%	27.64%
	G4% SUELO NATURAL + 6%RCM	22.96%	11.72%	11.24%
	G0% SUELO NATURAL + 10%RCM	25.70%	16.80%	8.90%
	86% SUELO NATURAL + 14%RCM	22.15%	13.79%	8.36%
C-05	100% SUELO NATURAL	21.73%	12.52%	9.20%
	G4% SUELO NATURAL + 6%RCM	22.33%	10.60%	11.73%
	G0% SUELO NATURAL + 10%RCM	22.53%	14.00%	8.53%
	86% SUELO NATURAL + 14%RCM	23.40%	14.17%	9.23%

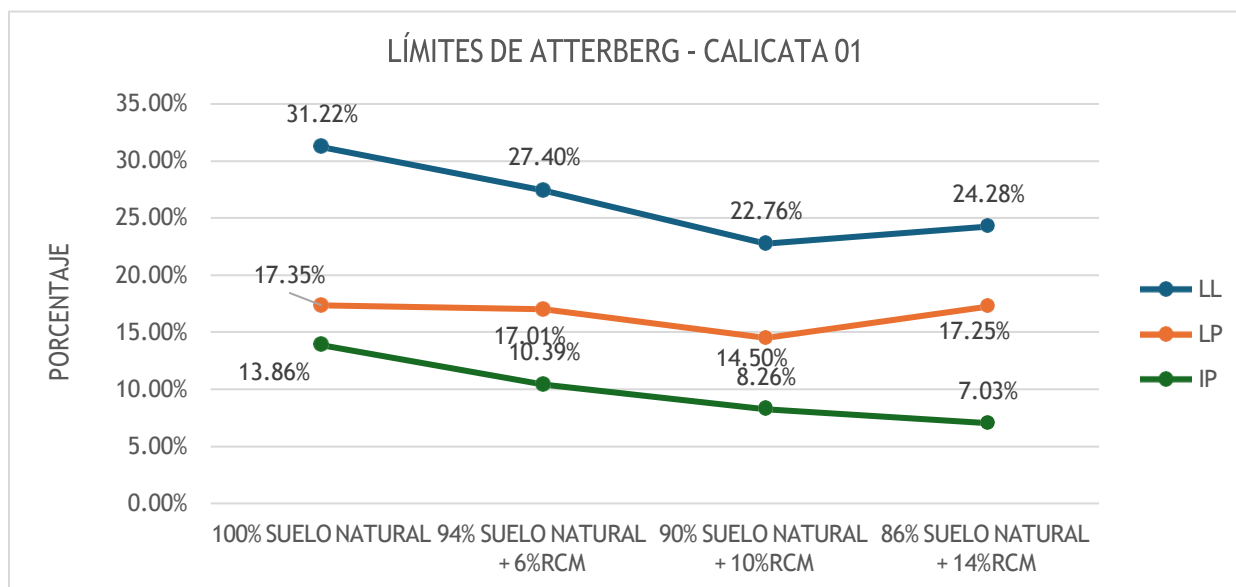
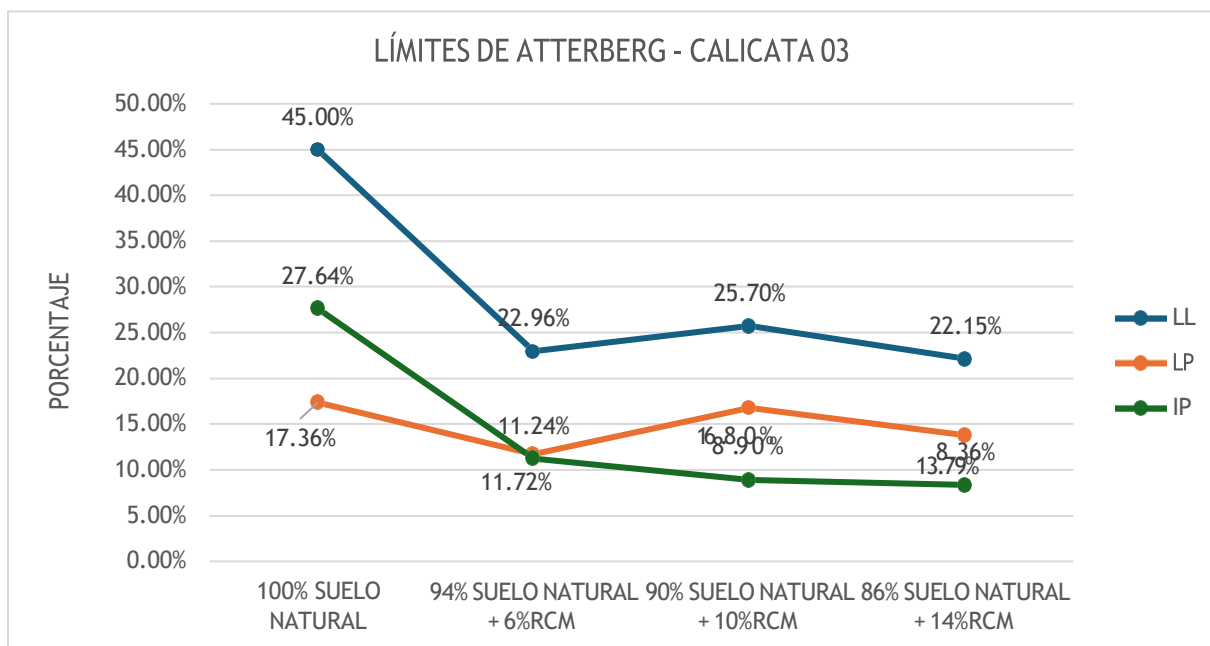
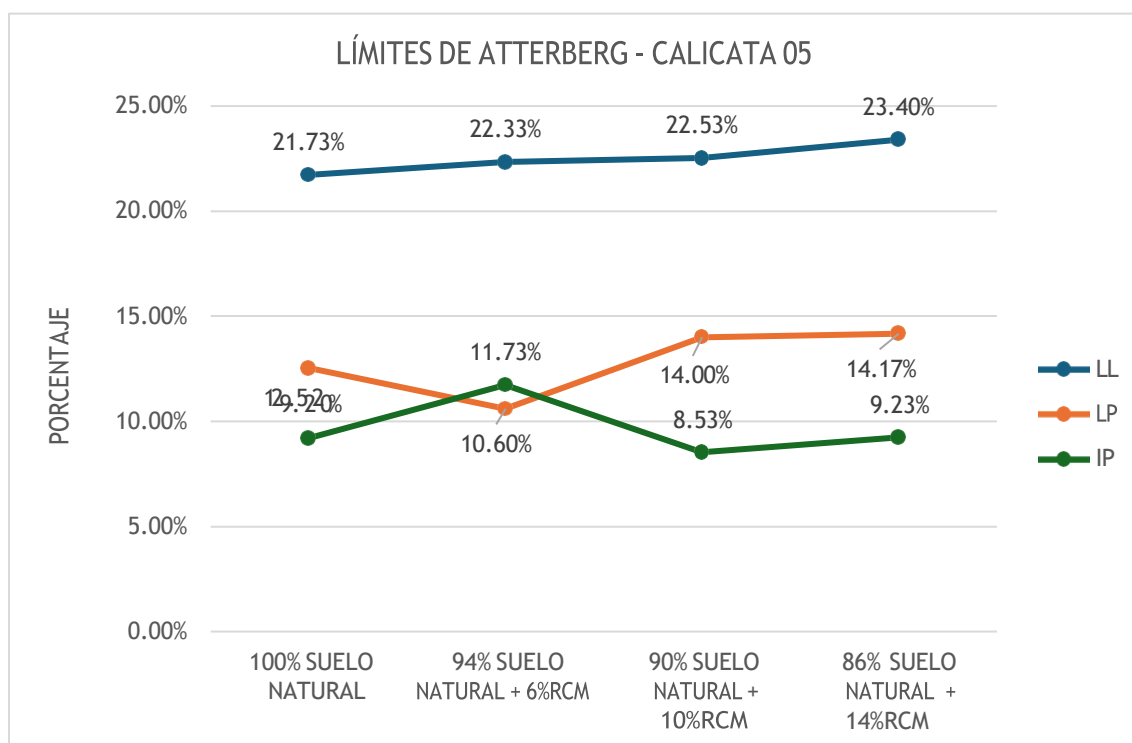


Gráfico 4: Gráfico de Límites de Atterberg de C-01



*Gráfico 5: Gráfico de Límites de Atterberg de C-03*



*Gráfico 6: Gráfico de Límites de Atterberg de C-03*

Tabla XXXIII: Límites Romerillo

<b>Ensayo de Límite de Atterberg</b>		
Límite líquido (LL)	33.63	(%)
Límite Plástico (LP)	22.94	(%)
Índice Plástico (IP)	10.70	(%)

## 5. Clasificación de suelos según AASHTO y SUCS

Con base en los resultados obtenidos del análisis granulométrico por tamizado y los límites de Atterberg, se procedió a clasificar el tipo de suelo siguiendo las tablas establecidas en las normas AASHTO y SUCS. Esta clasificación se presenta en la tabla 34. Se identificó que las muestras C-01, C-02, C-03, C-04 y C-05 corresponden a una arcilla de baja plasticidad (CL) según el sistema SUCS. Por otro lado, el Romerillo se clasificó como una arena pobremente graduada con presencia de arcilla y grava, con designación SP-SC en SUCS, y corresponde a la categoría A-2-6 (0) según el sistema AASHTO.

Tabla XXXIV: Clasificación según AASHTO Y SUCS

Calicata	DOSIFICACIÓN	MUESTRA	AASHTO	SUCS
C-01	100% SUELO NATURAL	Promedio	A-6 (12)	CL
C-02	100% SUELO NATURAL	Promedio	A-6 (9)	CL
C-03	100% SUELO NATURAL	Promedio	A-7-6 (15)	CL
C-04	100% SUELO NATURAL	Promedio	A-6 (12)	CL
C-05	100% SUELO NATURAL	Promedio	A-4 (9)	CL
-	ROMERILLO	Promedio	A-2-6 (0)	SP-SC

### ❖ Ensayos Mecánicos: Proctor Modificado y CBR

#### 6. Proctor Modificado

El ensayo de Proctor modificado se realizó siguiendo las especificaciones indicadas en la norma NTP 339.141. Se calculó el promedio de las tres muestras obtenidas para cada calicata y combinación, cuyos resultados resumidos se presentan en las tablas 35, 36, 37 y 38.

En el suelo natural, la calicata C-01 presentó una densidad seca máxima (MDS) de 1.78 g/cm<sup>3</sup> con un contenido óptimo de humedad (OCM) de 13.77%. Por su parte, la calicata C-02 registró una MDS de 1.72 g/cm<sup>3</sup> y un OCM de 14.22%. En la C-03, los valores obtenidos fueron una MDS de 1.78 g/cm<sup>3</sup> y un OCM de 14.03%. La C-04 presentó una MDS de 1.94 g/cm<sup>3</sup> y un OCM de 10.58%, mientras que la C-05 alcanzó una MDS de 1.79 g/cm<sup>3</sup> con un OCM de 13.07%.

Se observó que en la calicata C-01 la MDS disminuyó en los tres porcentajes de RCM evaluados. En contraste, en la C-03, la MDS disminuyó en el primer porcentaje, pero aumentó en los dos porcentajes restantes. Por último, en la C-05, los tres porcentajes de RCM

incrementaron en su MDS, manteniéndose todos por encima del valor correspondiente al suelo natural.

Tabla XXXV: Proctor Modificado Suelo Natural

Proctor Modificado Suelo Natural			
CALICATA	Muestra	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm <sup>3</sup> )
C-1	Promedio	13.77	1.78
C-2	Promedio	14.22	1.72
C-3	Promedio	14.03	1.78
C-4	Promedio	10.58	1.94
C-5	Promedio	13.07	1.79



Gráfico 7: Variación de M.D.S. Suelo Natural

Tabla XXXVI: Proctor Modificado C-01+ Adición

Proctor Modificado C-01			
CALICATA	Muestra	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm <sup>3</sup> )
SN	Promedio	13.77	1.78
SN + 6%RCM	Promedio	16.27	1.74
SN + 10% RCM	Promedio	14.77	1.66
SN + 14% RCM	Promedio	16.23	1.60

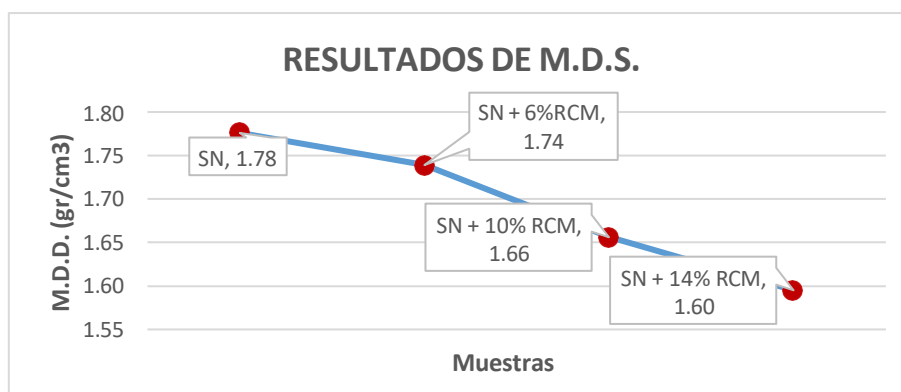


Gráfico 8: Variación de M.D.S. C-01+Adición

Tabla XXXVII: Proctor Modificado C-03 + Adición

Proctor Modificado C-03			
CALICATA	Muestra	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm <sup>3</sup> )
SN	Promedio	14.03	1.78
SN + 6%RCM	Promedio	9.37	1.73
SN + 10% RCM	Promedio	6.53	1.78
SN + 14% RCM	Promedio	7.07	1.79

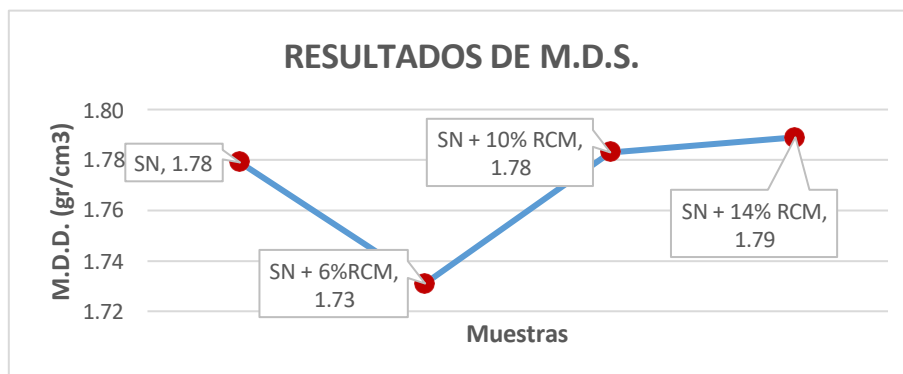


Gráfico 9: Variación de M.D.S. C-03 + Adición

Tabla XXXVIII: Proctor Modificado C-05 + Adición

Proctor Modificado C-05			
ALICATA	Muestra	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm <sup>3</sup> )
SN	Promedio	13.07	1.79
SN + 6%RCM	Promedio	4.93	1.84
SN + 10% RCM	Promedio	7.95	1.81
SN + 14% RCM	Promedio	6.95	1.82

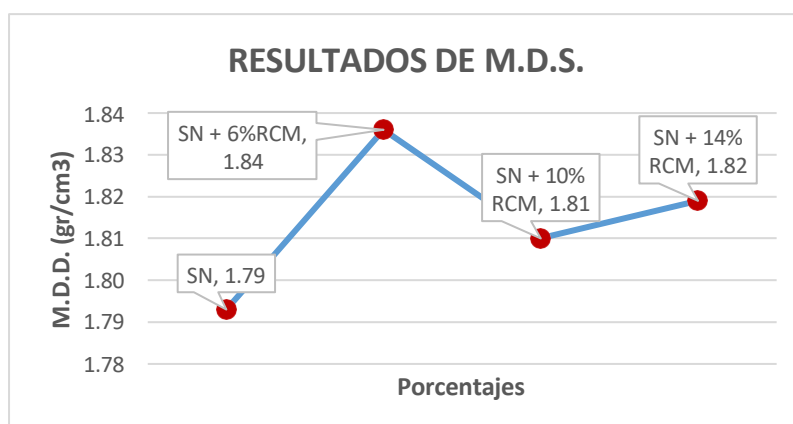


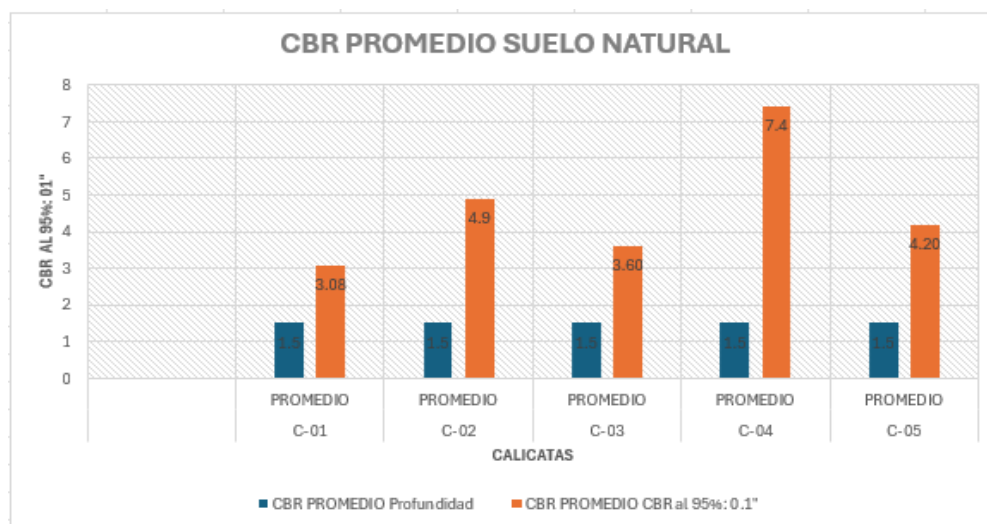
Gráfico 10: Variación de M.D.S. C-05

## 7. CBR (California Bearing Ratio)

El ensayo de CBR se realizó siguiendo los lineamientos de la ASTM. Se realizó el promedio de las 5 muestras realizadas a cada calicata para el suelo natural (SN) el resumen de resultados se puede apreciar en las siguientes tablas. Posteriormente también se evaluó con un porcentaje de adición al suelo natural de RCM (6%, 10% y 14%).

Dichos valores nos ayudaron a seleccionar las calicatas más desfavorables a trabajar que serían C-01, C-03 Y C-05 para que posteriormente evaluarlos experimentalmente con las adiciones destinadas (6%,10% y 14%)

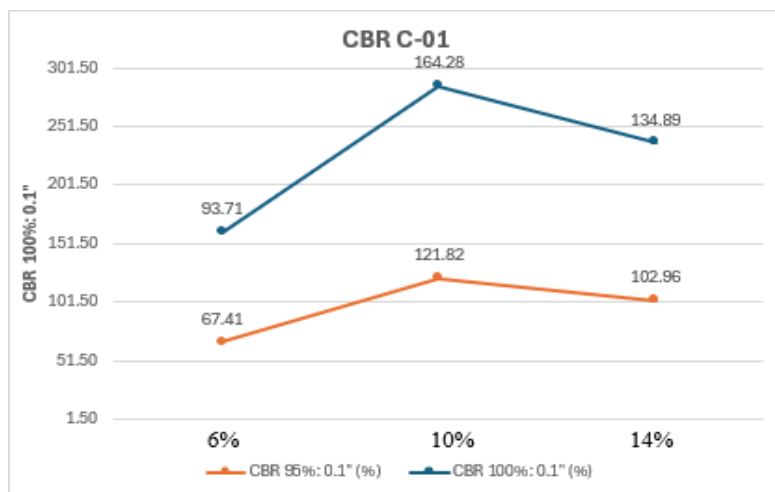
Los resultados indicaron que, en las tres calicatas, el mayor valor de capacidad de soporte del suelo se alcanzó con una adición del 10% de RCM. En esta condición, se obtuvieron valores máximos del índice CBR (al 95% de la MDS) de 121.82%, 70.69% y 68.65% para las calicatas 01, 03 y 05, respectivamente, tal como se muestra en la Tabla 39. Estas variaciones se representan gráficamente en las figuras 12, 13 y 14.



Gráfica 11: Promedio de CBR de Suelos Naturales

Tabla XXXIX: CBR Promedio Calicata 01

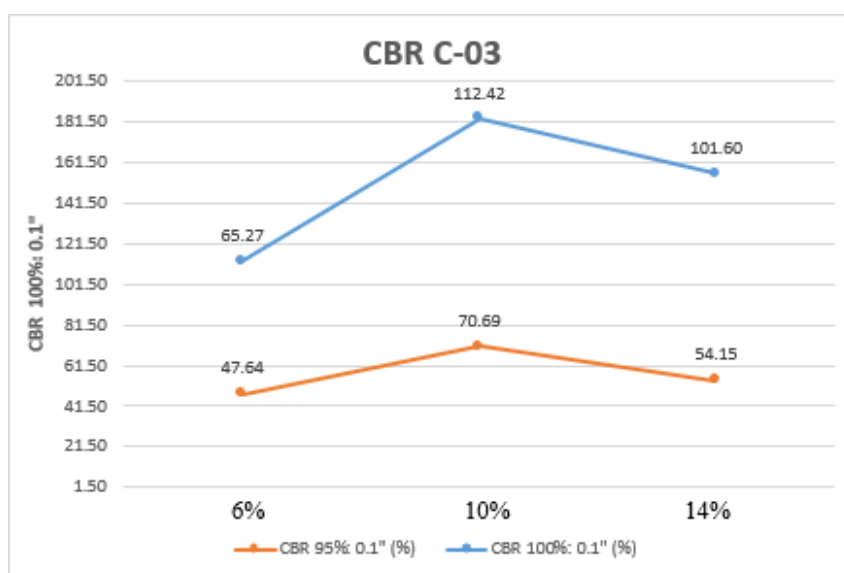
CBR PROMEDIO CALICATA 01						
CALICATA	Muestra	ADICIÓN	CBR al 100%: 0.1"	CBR al 95%: 0.1"	CBR al 100%: 0.2"	CBR al 95%:0.2"
C-01	PROMEDIO	6%	93.71	67.41	110.54	78.69
C-01	PROMEDIO	10%	164.28	121.82	191.80	144.03
C-01	PROMEDIO	14%	134.89	102.96	171.39	128.52



Gráfica 12: Promedio CBR con adición C01

Tabla XL: CBR Promedio Calicata 03

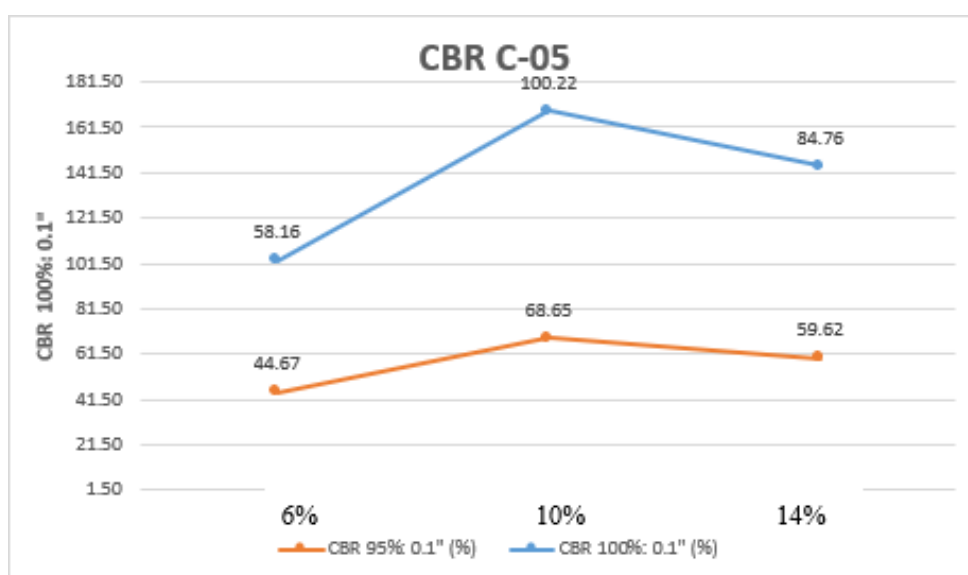
CBR PROMEDIO CALICATA 03						
CALICATA	Muestra	ADICIÓN	CBR al 100%: 0.1"	CBR al 95%: 0.1"	CBR al 100%: 0.2"	CBR al 95%: 0.2"
C-03	PROMEDIO	6%	65.27	47.64	73.63	52.97
C-03	PROMEDIO	10%	112.42	70.69	131.21	79.83
C-03	PROMEDIO	14%	101.60	54.15	114.56	59.77



Gráfica 13: Promedio CBR con adición C03

Tabla XLI: CBR Promedio Calicata 05

CBR PROMEDIO CALICATA 05						
CALICATA	Muestra	ADICIÓN	CBR al 100%: 0.1"	CBR al 95%: 0.1"	CBR al 100%: 0.2"	CBR al 95%:0.2"
C-05	PROMEDIO	6%	58.16	44.67	82.70	60.48
C-05	PROMEDIO	10%	100.22	68.65	128.01	85.88
C-05	PROMEDIO	14%	84.76	59.62	102.80	71.43



Gráfica 14: Promedio CBR con adición C05

- **Determinación de la dosificación óptima de adición la mezcla romerillo y carbón molido (RCM)**

Según los datos observados en el gráfico 12, 13 y 14, se obtuvo que el valor máximo de CBR en las 03 calicatas fue con la adición de 10% de RCM. Obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla XLII. Determinación óptima de adición de CBCE

CBR al 95%: 0.1"		
CALICATA	SUELO NATURAL (100%)	CBR al 95%: 0.1" (90%SN+10%)
C-01	3.08	121.82
C-03	3.6	70.69
C-05	4.2	68.65

El porcentaje ideal de incorporación de RCM para mejorar la estabilidad del suelo arcilloso tipo CL fue del 10%.

- **Análisis Económico**

Se llevó a cabo un estudio económico enfocado en los estabilizadores predominantes en el mercado, específicamente cemento y cal. En este análisis se tomaron en cuenta variables como el precio comercial y la cantidad requerida, determinada según el porcentaje óptimo para cada tipo de adición y combinación. Los cálculos se realizaron a partir de la muestra de suelo y la cantidad de agentes estabilizantes necesarios para el tratamiento de un metro cuadrado.

### **Cemento**

Considerando un área de 1 m<sup>2</sup>, un espesor de 0.2 m y un peso específico del suelo de 1900 kg/m<sup>3</sup>, el volumen de suelo evaluado corresponde a 0.2 m<sup>3</sup>. Esto implica un peso total de 380 kg para dicha sección de la calzada.

Peso Húmedo:

$$1 \text{ m} * 1 \text{ m} * 0.20 \text{ m} * 1900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 380 \text{ kg}$$

Calculando el peso seco con el O.C.H obtenido en nuestros ensayos: 21.07

$$PW = \frac{\frac{21.07}{100} * 380}{1 + \frac{21.07}{100}} = 66.13$$

### **Calculando la cantidad de cemento al 15%**

$$(\text{Peso Húmedo} - \text{Peso agua}) * 0.15 = 47.08 \text{ kg}$$

### **Porcentaje del peso seco**

$$(380 - 66.13) * 0.15 = 47.08 \text{ kg}$$

A continuación, se llevó a cabo un Análisis de Precios Unitarios (APU) basado en los costos actuales del mercado, considerando una cuadrilla compuesta por un capataz y cinco peones, con un rendimiento estimado de 60 m<sup>2</sup>. Este análisis contempló además el uso de una motoniveladora y una jornada laboral de ocho horas. Para determinar la cantidad de bolsas de cemento necesarias, se dividió el peso total requerido de 47.08 kg entre el contenido estándar de una bolsa, que es de 42.5 kg.

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON 15% DE CEMENTO**

**1 TRAZO Y REPLANTEO**

**1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE 15% DE CEMENTO**

1.1.1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE 15% DE CEMENTO						
<b>m<sup>2</sup>/DÍA</b>	<b>60.0000</b>	<b>EQ.</b>	<b>60.0000</b>	Costo unitario directo por: m <sup>2</sup>		<b>104.87</b>
<b>Descripción Recurso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio \$.</b>	<b>Parcial \$.</b>	
<b>Mano de Obra</b>						
CÁPATAZ	hh	0.1000	0.0133	27.49	0.37	
PEÓN	hh	5.0000	0.6667	18.12	12.08	
Total mano de obra (\$.)					<b>12.45</b>	
<b>Materiales</b>						
CEMENTO	bls	-	1.1078	28.50	31.57	
AGUA PUESTA EN OBRA	m3	-	0.0317	15.00	0.48	
Total materiales (\$.)					<b>32.05</b>	
<b>Equipos</b>						
MOTONIVELADORA O RIPPER	hm	1.0000	0.1333	450.00	60.00	
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	-	0.0300	12.45	0.37	
Total equipos/herramientas (\$.)					<b>60.37</b>	

El análisis de precios unitarios para la estabilización con cal, carbón molido (CM), Romerillo (R) y la combinación de carbón molido con Romerillo (CM+RM) se realizará de manera similar. Para el APU correspondiente a la estabilización con cal, se consideró que el contenido de las bolsas de cal es de 20 kg, conforme a las presentaciones comerciales habituales. Este procedimiento permite estimar los costos tomando en cuenta los insumos, mano de obra y maquinaria necesarios para cada tipo de estabilización, siguiendo criterios técnicos y económicos vigentes en el mercado.

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL**

**1 TRAZO Y REPLANTEO**

**1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE CAL**

1.1.1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE CAL						
<b>m<sup>2</sup>/DÍA</b>	<b>60.0000</b>	<b>EQ.</b>	<b>60.0000</b>	Costo unitario directo por: m <sup>2</sup>		<b>126.16</b>
<b>Descripción Recurso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio \$.</b>	<b>Parcial \$.</b>	
<b>Mano de Obra</b>						
CÁPATAZ	hh	0.1000	0.0133	27.49	0.37	
PEÓN	hh	5.0000	0.6667	18.12	12.08	
Total mano de obra (\$.)					<b>12.45</b>	
<b>Materiales</b>						
CAL	bls	-	2.6430	20.00	52.86	
AGUA PUESTA EN OBRA	m3	-	0.0317	15.00	0.48	
Total materiales (\$.)					<b>53.34</b>	
<b>Equipos</b>						
MOTONIVELADORA O RIPPER	hm	1.0000	0.1333	450.00	60.00	
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	-	0.0300	12.45	0.37	
Total equipos/herramientas (\$.)					<b>60.37</b>	

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON 14% DE CM****1 TRAZO Y REPLANTEO****1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE 14% DE CM**

1.1.1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE 14% DE CM							
m <sup>2</sup> /DÍA	60.0000	EQ.	60.0000	Costo unitario directo por: m <sup>2</sup>			94.58
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.		
<b>Mano de Obra</b>							
CÁPATAZ	hh	0.1000	0.0133	27.49	0.37		
PEÓN	hh	5.0000	0.6667	18.12	12.08		
Total mano de obra (\$/.)						<b>12.45</b>	
<b>Materiales</b>							
CARBON MOLIDO	kg	-	53.2000	0.40	21.28		
AGUA PUESTA EN OBRA	m <sup>3</sup>	-	0.0317	15.00	0.48		
Total materiales (\$/.)						<b>21.76</b>	
<b>Equipos</b>							
MOTONIVELADORA C/ RIPPER	hm	1.0000	0.1333	450.00	60.00		
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	-	0.0300	12.45	0.37		
Total equiposherramientas (\$/.)						<b>60.37</b>	

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON 14% DE RM****1 TRAZO Y REPLANTEO****1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE 14% DE RM**

1.1.1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE 14% DE RM							
m <sup>2</sup> /DÍA	60.0000	EQ.	60.0000	Costo unitario directo por: m <sup>2</sup>			99.90
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.		
<b>Mano de Obra</b>							
CÁPATAZ	hh	0.1000	0.0133	27.49	0.37		
PEÓN	hh	5.0000	0.6667	18.12	12.08		
Total mano de obra (\$/.)						<b>12.45</b>	
<b>Materiales</b>							
ROMERILLO	kg	-	53.2000	0.50	26.60		
AGUA PUESTA EN OBRA	m <sup>3</sup>	-	0.0317	15.00	0.48		
Total materiales (\$/.)						<b>27.08</b>	
<b>Equipos</b>							
MOTONIVELADORA C/ RIPPER	hm	1.0000	0.1333	450.00	60.00		
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	-	0.0300	12.45	0.37		
Total equiposherramientas (\$/.)						<b>60.37</b>	

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON 5% DE RM Y 5% DE CM****1 TRAZO Y REPLANTEO****1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y CON ADICIÓN DE 5% DE RM Y 5% DE CM**

1.1.1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE 14% DE RM							
m <sup>2</sup> /DÍA	60.0000	EQ.	60.0000	Costo unitario directo por: m <sup>2</sup>			89.92
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.		
<b>Mano de Obra</b>							
CÁPATAZ	hh	0.1000	0.0133	27.49	0.37		
PEÓN	hh	5.0000	0.6667	18.12	12.08		
Total mano de obra (\$/.)						<b>12.45</b>	
<b>Materiales</b>							
ROMERILLO	kg	-	19.0000	0.50	9.50		
CARBON MOLIDO	kg	-	19.0000	0.40	7.60		
AGUA PUESTA EN OBRA	m <sup>3</sup>	-	0.0317	15.00	0.48		
Total materiales (\$/.)						<b>17.10</b>	
<b>Equipos</b>							
MOTONIVELADORA C/ RIPPER	hm	1.0000	0.1333	450.00	60.00		
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	-	0.0300	12.45	0.37		
Total equiposherramientas (\$/.)						<b>60.37</b>	

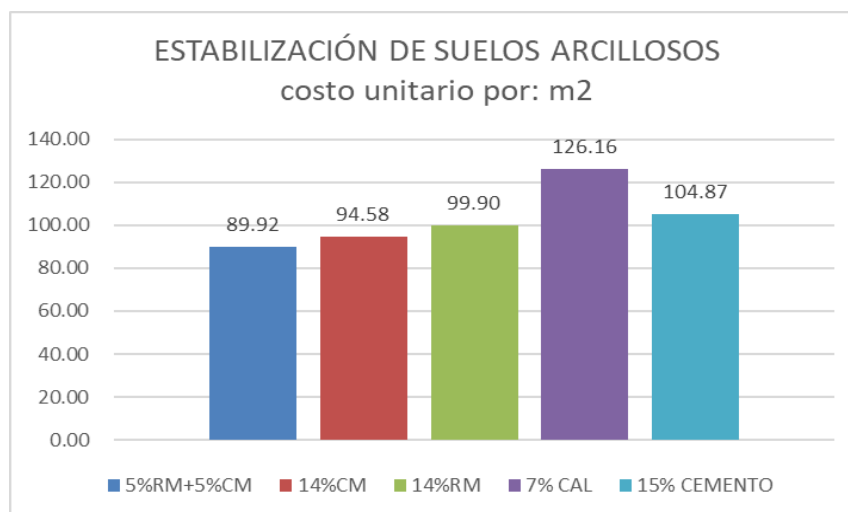
COSTO DE CARBÓN	20
PREPARACIÓN DE CARBON MOLIDO (MÁQUINA DE MOLIDO)	80

Se asignó un costo mínimo de S/. 20.00 al carbón molido (CM), mientras que para su preparación se estimó un costo de S/. 80.00. Esta última cifra es una aproximación, dado que las máquinas utilizadas pueden procesar mayores volúmenes. Con estos valores, se procedió a calcular el costo total asociado al carbón molido.

- Considerando el costo de alquiler del molino= S/. 80
- Carbón = S/. 20
- Producción aproximada = 250 kg

Costo de Producción del carbón molido =  $(80+20) / 250 = S/. 0.40$

El costo del RM se consideró un costo de S/. 0.50 el kg de material puesto en obra.



Gráfica 15: Comparación de Costos de Estabilizantes.

Como se evidencia en la Gráfica 15, la estabilización utilizando cal representa el mayor costo, mientras que la opción más económica corresponde a la combinación de 5% RM y 5% CM. Esta variación se debe a que, en el análisis de precios unitarios, se asignaron costos de S/.0.40 para el carbón molido (CM) y de S/. 0.50 para el Romerillo (RM), respectivamente.

- **Análisis comparativo del efecto entre el romerillo y carbón molido en diferentes porcentajes sobre el comportamiento mecánico de la subrasante**

El análisis de los resultados revela que, en las tres calicatas evaluadas, la mayor resistencia CBR se logra al incorporar un 14% de Romerillo o carbón molido. En particular, el mayor valor promedio del índice CBR al 95% de la Densidad Seca Máxima (MDS) con la adición de

Romerillo se obtuvo en el pozo C-01, alcanzando un 39.64%. En contraste, al usar carbón molido, el valor máximo se observó en el pozo C-05 con un 35,98% relativo al MDS.

Tabla XLIII: Valores de CBR - C01

	CBR 95%: 0.1" (%)	CBR 100%: 0.1" (%)
100% Suelo Natural	3.4	4.4
<b>R</b>		
94% SN + 6% R	28.98	36.10
90% SN + 10% R	28.94	36.28
86% SN + 14% R	39.64	44.72
<b>CM</b>		
94% SN + 6% CM	18.70	24.32
90% SN + 10% CM	32.80	43.48
86% SN + 14% CM	32.86	43.70

Resultados R en C-01

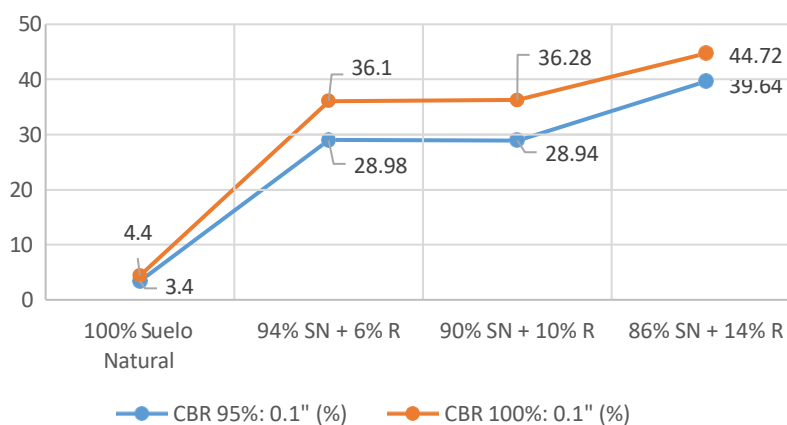


Gráfico 16: Resultados de CBR - R - C01

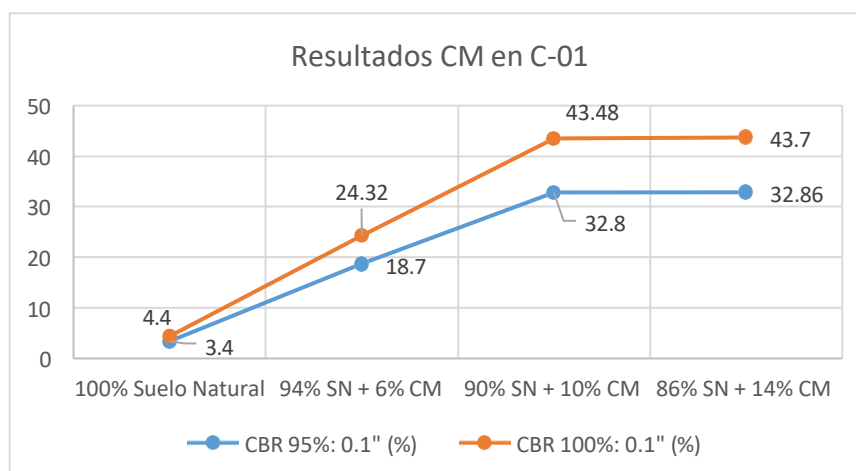


Gráfico 17: Resultados de CBR - CM - C01

Tabla XLIV: Valores de CBR - C03

	CBR 95%: 0.1" (%)	CBR 100%: 0.1" (%)
100% Suelo Natural	3.4	4.4
<b>R</b>		
94% SN + 6% R	22.24	36.10
90% SN + 10% R	35.06	43.26
86% SN + 14% R	30.26	39.06
<b>CM</b>		
94% SN + 6% CM	19.62	25.18
90% SN + 10% CM	31.10	40.18
86% SN + 14% CM	33.38	44.60

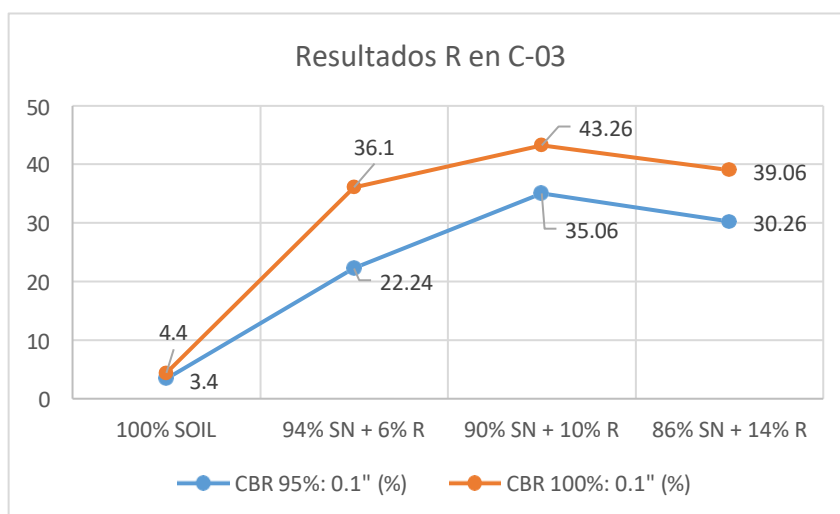


Gráfico 18: Resultados de CBR - R - C03

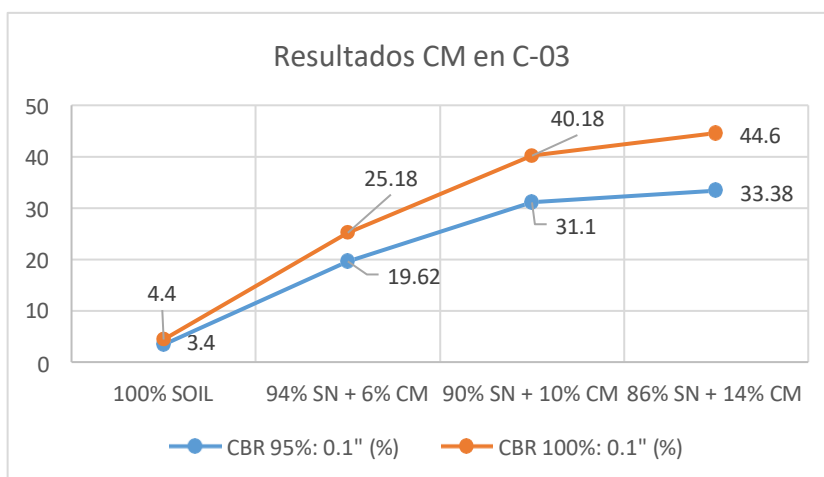


Gráfico 19: Resultados de CBR - CM - C03

Tabla XLV: Valores de CBR - C05

	CBR 95%: 0.1" (%)	CBR 100%: 0.1" (%)
<b>100% Suelo Natural</b>	3.4	4.4
<b>R</b>		
<b>94% SN + 6% R</b>	15.28	18.08
<b>90% SN + 10% R</b>	24.58	28.90
<b>86% SN + 14% R</b>	29.96	35.92
<b>CM</b>		
<b>94% SN + 6% CM</b>	17.26	21.78
<b>90% SN + 10% CM</b>	32.24	41.24
<b>86% SN + 14% CM</b>	35.98	44.24

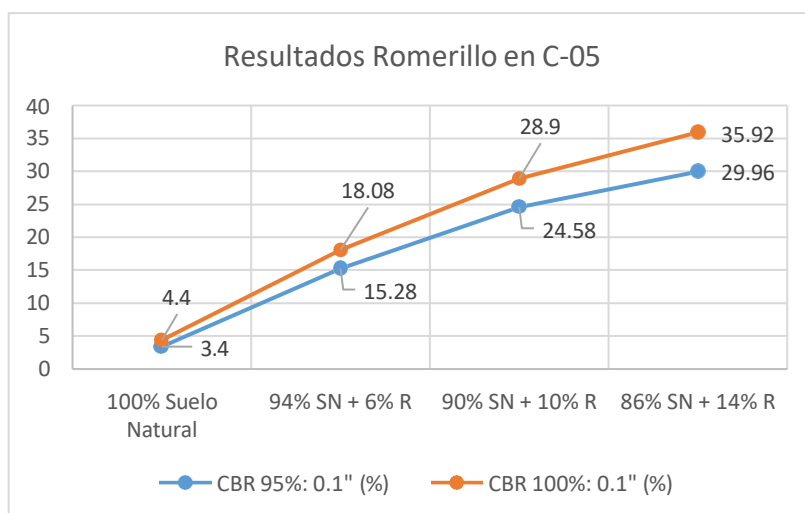


Gráfico 20: Resultados de CBR - R - C05

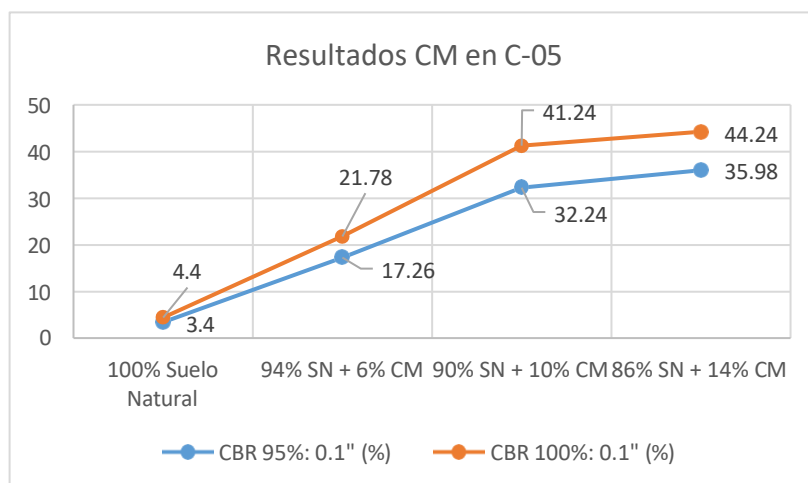


Gráfico 21: Resultados de CBR - CM - C05

Basado en el análisis de los resultados obtenidos, se identifica que la máxima resistencia CBR en los tres puntos de muestreo se logra al incorporar un 14% de Romerillo y un 14% de carbón molido. Esto indica que el porcentaje óptimo para la adición individual de ambos materiales para la estabilización del suelo arcilloso tipo CL es del 14%.

Cabe destacar que, según la clasificación del MTC, el suelo natural presente en las tres calicatas de prueba se considera de baja calidad. Sin embargo, al incorporar un 14% de Romerillo y un 14% de carbón molido, la calidad del suelo mejora significativamente, siendo reclasificada como excelente según los estándares del MTC.

Específicamente, el valor más alto de CBR al 95% de la Densidad Seca Máxima (MDS) con la adición de Romerillo se registró en la C-01, con un valor de 44.50%, mientras que el valor más alto con carbón molido se obtuvo en el C-05, alcanzando 38.60%.

*Tabla XLVI: Valores de CBR in C-1-03-05 +14%R*

	CBR 95%: 0.1" (%)	CBR 100%: 0.1" (%)
100% SN	3.4	4.4
C1 - 14% R	44.50	49.30
C3 - 14% R	34.60	54.00
C5 - 14% R	37.00	48.20

*Tabla XLVII. Valores de CBR in C-1-03-05 +14%CM*

	CBR 95%: 0.1" (%)	CBR 100%: 0.1" (%)
100% SN	3.4	4.4
C1 - 14% CM	37.10	42.90
C3 - 14% CM	34.70	43.80
C5 - 14% CM	38.60	45.80

## Discusiones

En relación con el primer objetivo específico, se llevó a cabo la caracterización del romerillo y del carbón molido mediante la técnica de espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF), la cual permitió determinar los principales elementos químicos presentes y su distribución porcentual en cada material. Los estudios sobre la composición química del romerillo, realizados en cuatro investigaciones diferentes, mostraron un elevado contenido de óxido de fósforo (12.03%), óxido de calcio (9.02%) y sílice (5.67%). Por otro lado, en el análisis del carbón molido, se detectaron concentraciones significativas de carbono (66.68%), sílice (12.07%) y óxido de fósforo (6.84%), según lo reportado por Córdova et al [10]. Las diferencias en los porcentajes de fósforo, sílice, calcio y carbono se atribuyen a la variabilidad en las fuentes

de extracción y a la calidad del romerillo utilizado. Por ello, resulta fundamental especificar las variedades de carbón antes de su molienda y análisis para comprender mejor estas variaciones en la composición química.

En relación con el segundo objetivo específico, En esta investigación, el suelo natural extraído de las tres calicatas fue clasificado mediante la aplicación de dos ensayos fundamentales, los cuales permiten caracterizar sus propiedades físicas y mecánicas para una adecuada evaluación geotécnica: la granulometría por tamizado, conforme a la norma MTC E 107, y los límites de Atterberg, siguiendo la NTP 339.129. Los resultados indicaron que los suelos de las tres calicatas corresponden a arcillas de baja plasticidad (CL) según el sistema SUCS, y se ubican dentro de la categoría A-6(10) según la clasificación AASHTO. Estos hallazgos son consistentes con los reportados por Córdova [10], quien identificó que las calicatas 1 y 2 contenían suelos clasificados como arcillas de baja plasticidad (CL), con índices de plasticidad de 6 y 11, respectivamente, bajo ambos sistemas de clasificación.

Adicionalmente, la incorporación del 10% de residuo de carbón molido (RCM) al suelo natural provocó un cambio en su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), lo cual se refleja en los valores obtenidos del índice CBR (California Bearing Ratio). Este resultado indica una mejora en las propiedades mecánicas del suelo tratado, evidenciando un aumento en su capacidad de soporte y resistencia.

Por último, a partir de los análisis realizados mediante espectroscopía de fluorescencia de rayos X y la caracterización granulométrica del carbón molido y el romerillo, se deduce que estos materiales poseen propiedades puzolánicas, lo que podría explicar su efecto estabilizador en la mezcla con el suelo natural.

En relación con el tercer objetivo específico, se realizaron múltiples ensayos para caracterizar tanto el suelo natural como los materiales adicionados. Entre estos ensayos se incluyen la determinación de la gravedad específica, los límites de consistencia, el análisis granulométrico por tamizado, el ensayo de Proctor modificado y la prueba de CBR. La gravedad específica del suelo natural se mantuvo cercana a 2.56, 2.51 y 2.54 para las calicatas 01, 03 y 05, respectivamente; mientras que para el romerillo y el carbón molido se registraron valores de 2.71 y 2.61. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos establecidos por el MTC E 113 y el manual de ensayos de materiales, que indican valores entre 2.65 y 2.68 para materiales con grava y entre 2.65 y 2.9 para suelos arcillosos.

En cuanto a la granulometría por tamizado, las cinco calicatas presentaron un predominio de limos y arcillas con porcentajes promedio de 80.97%, 79.50%, 87.63%, 91.30% y 89.33% para

las calicatas C-01 a C-05, respectivamente. Por su parte, el romerillo mostró una composición de 33.9% grava, 59.4% arena y 6.7% limos y arcillas, resultados similares a los reportados por Coba [7], quien encontró para el romerillo un 30.5% de grava, 60.9% de arena y 8.6% de limos y arcillas en su estudio con suelos arcillosos.

En cuanto a los límites de Atterberg, la adición del 10% de residuo de carbón molido (RCM) en la calicata 01 provocó incrementos significativos del 22.76% en el límite líquido (LL), del 14.50% en el límite plástico (LP) y del 8.26% en el índice de plasticidad (IP), lo que indica una modificación en las propiedades de consistencia del suelo tratadas con este aditivo. En la calicata 03, estos aumentos fueron menores, con 2.94% en LL, 2.3% en LP y 0.64% en IP, mientras que en la calicata 05 se observó una ligera disminución en LL (0.23%) y LP (0.50%), y un leve aumento en IP (0.27%). Estos comportamientos son comparables a los reportados por Coba [7], quien registró un límite líquido máximo del 35% y un índice de plasticidad máximo de 9% en dosificaciones similares, cumpliendo con los lineamientos establecidos.

El incremento en los límites líquido y plástico se atribuye a las propiedades puzolánicas y la porosidad de las adiciones, que favorecen una mayor cohesión entre partículas y aumentan la capacidad de retención de agua en las muestras.

Se llevó a cabo el ensayo de Proctor modificado en el suelo natural sin aditivos, obteniéndose para la calicata C-01 una densidad seca máxima (MDS) de  $1.78 \text{ g/cm}^3$  y un contenido óptimo de humedad (OCM) del 13.77%. En la calicata C-03, los valores fueron similares, con una MDS de  $1.78 \text{ g/cm}^3$  y un OCM de 14.03%, mientras que en la C-05 se registró una MDS de  $1.79 \text{ g/cm}^3$  y un OCM de 13.07%.

Al evaluar la influencia del residuo de romerillo y carbón molido (RCM) en diferentes proporciones (6%, 10% y 14%), se observó que en la calicata C-01 la MDS disminuyó en los tres casos. Por otro lado, en la C-03 la MDS descendió con la primera proporción, pero aumentó con las dos siguientes. En la calicata C-05, todas las proporciones de RCM incrementaron la MDS, manteniéndose por encima del valor del suelo natural. Estos resultados son consistentes con los reportados por Coba [7], quien encontró un aumento en la densidad seca máxima al adicionar romerillo en su porcentaje óptimo. Asimismo, según Córdova, el carbón molido mostró una reducción en el índice de carga de hinchamiento (OCH), con valores de 11.75%, 11.82% y 11.94% para las distintas calicatas.

Las variaciones en la MDS se atribuyen a la densidad, las propiedades puzolánicas y la porosidad tanto del carbón molido como del romerillo, factores que influyen en la compactación del suelo.

En cuanto al ensayo CBR, la incorporación del 10% de RCM incrementó significativamente el valor del CBR (a un 95% de la MDS), con aumentos del 121.82%, 70.69% y 68.65% para las calicatas 01, 03 y 05, respectivamente. Este comportamiento es similar a lo observado en estudios previos de Tuesta, Gómez y Córdova, quienes reportaron mejoras en el CBR al adicionar porcentajes óptimos de romerillo y carbón molido.

El incremento en la resistencia CBR se explica por las características puzolánicas de las cenizas adicionadas, que favorecen una mayor cohesión y rigidez interna en la mezcla del suelo.

En relación con el cuarto objetivo específico, se llevó a cabo un análisis económico que reveló que la aplicación del porcentaje óptimo del 10% de residuo de carbón molido (RCM) implica un costo unitario de 89.92 soles por metro cuadrado. Este valor resulta ser aproximadamente 1.4 veces más económico en comparación con la estabilización utilizando cemento o cal. Asimismo, la estabilización empleando únicamente romerillo o carbón molido mostró ser 1.33 y 1.26 veces más rentable, respectivamente, en relación con los métodos tradicionales.

En relación con el quinto objetivo específico, el valor máximo del CBR al 95% de la Densidad Seca Máxima (MDS) se obtuvo al incorporar un 14% de adición. En particular, con la adición de romerillo, la calicata C-01 alcanzó un CBR de 44.50%, mientras que, con carbón molido, el valor más alto se registró en la calicata C-05, con un 38.60%. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Coba [7], quien reportó un CBR de 64.46% al 95% de MDS utilizando romerillo como estabilizante.

## Conclusiones

1. Los resultados del análisis químico mediante espectroscopía de fluorescencia de rayos X revelan que el romerillo contiene principalmente pentóxido de fósforo (12.03%), óxido de potasio (9.38%), óxido de calcio (7.64%) y dióxido de silicio (5.67%), siendo estos los componentes más relevantes. En contraste, el carbón molido presenta una composición dominada por carbono (61.19%), seguido de dióxido de silicio (12.07%) y fósforo (6.84%). Estas características químicas indican que ambos materiales son adecuados para su uso como estabilizadores, ya sea de forma conjunta o individualmente, especialmente en suelos arcillosos.
2. Los resultados mostraron que los suelos extraídos de las tres calicatas corresponden a arcillas de baja plasticidad (CL) según el sistema SUCS, y se ubican dentro de la categoría A-6(10) según la clasificación AASHTO, concluyendo que dichos suelos en la investigación tienen un desempeño malo para subrasantes.
3. Al evaluar en el proctor modificado la influencia del compuesto de romerillo y carbón molido (RCM) en diferentes proporciones (6%, 10% y 14%), se observó que en la calicata C-01 la MDS disminuyó en los tres casos. Por otro lado, en la C-03 la MDS descendió con la primera proporción, pero aumentó con las dos siguientes. En la calicata C-05, todas las proporciones de RCM incrementaron la MDS, manteniéndose por encima del valor del suelo natural.
4. Se obtuvo un incremento significativo en el valor del CBR con la adición de residuo de carbón molido (RCM), siendo el porcentaje óptimo del 10%. En este caso, el CBR al 95% de la densidad seca máxima aumentó en un 121.82%, 70.69% y 68.65% para las calicatas 01, 03 y 05, respectivamente. Estos hallazgos demuestran que el residuo de carbón molido (RCM) actúa como un agente estabilizador efectivo para suelos arcillosos con baja plasticidad.
5. La adición óptima de 10% de RCM resulta ser aproximadamente 1.4 veces más económico en comparación con la estabilización utilizando cemento o cal. Asimismo, la estabilización empleando únicamente romerillo o carbón molido mostró ser 1.33 y 1.26 veces más rentable, respectivamente, en relación con los métodos tradicionales.
6. El resultado de la comparativa entre los estabilizantes adicionales independientes entre el romerillo y carbón molido, tenemos el CBR al 95% con la mejor adición que fue 14% para ambos, el romerillo en la C-01 logró un 44.50%, mientras que, con carbón molido, el valor más alto se registró en la calicata C-05, con un 38.60%.

## Recomendaciones

1. Es importante emplear técnicas analíticas más detalladas que la fluorescencia de rayos X, para así obtener información no solo sobre la composición química, sino también sobre el tamaño de las partículas, su forma y otras características morfológicas.
2. Se sugiere realizar estudios con diferentes tipos de suelo a los distintos evaluadores de este estudio, para comprender mejor el comportamiento del RCM cuando es utilizado como agente estabilizador bajo diversas condiciones.
3. En relación con el tercer objetivo específico, se recomienda realizar ensayos de corte directo y consolidación unidimensional para determinar parámetros esenciales del suelo, como la cohesión y el ángulo de fricción interna. De igual manera, sería beneficioso emplear una gradación distinta a la utilizada en esta investigación para evaluar si el tamaño de las partículas afecta la mejora de las propiedades mecánicas en suelos arcillosos.
4. Se recomienda experimentar con proporciones distintas a las utilizadas en esta investigación, es decir, probar mezclas que no sean 50% romerillo y 50% carbón molido, para explorar otras posibles combinaciones.
5. Se sugiere probar con porcentajes cercanos al 10%, con la finalidad de identificar cuál es la concentración óptima que permita obtener mejores resultados que los logrados en la presente investigación.
6. Es recomendable realizar un análisis económico más detallado y realista, para contar con una evaluación más precisa del beneficio financiero que representa el uso de romerillo y carbón molido como estabilizadores de subrasantes.

## Referencias

- [1] L. A. Fernando Juan, “Adoquines de concreto propiedades físico-mecánicas y sus correlaciones,” Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), 2006.
- [2] H. Gonzales Arce, “Influencia de la mezcla Romerillo y Cemento para mejorar las propiedades mecánicas de la carpeta de rodadura del camino vecinal empalme Carretera Fernando Belaunde Terry (Km463+500)-Tamboyacu-Rioja -San Martín”, Univ. Cesar Vallejo, Moyobamba, 2018.
- [3] M.T.C, Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Lima: Dirección Ger. Caminos Ferrocarriles, 2008.
- [4] I. Akinwumi et al, "Soil Improvement Using Blends of Coal Ash and Plantain Peel Ash as Road Pavement Layer Materials," Resources, vol.12, (3), pp. 41, 2023.Available: <http://usat.lookproxy.com/scholarly-journals/soil-improvement-using-blends-coal-ash-plantain/docview/2791698253/se-2>. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources12030041>.
- [5] T. Zafar et al, “Soil stabilization by reinforcing natural and synthetic fibers – A state of the art review”, April, 2023.Available:<https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S2214785323015420>.DOI:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.503>
- [6] Z. Zimar et al, “Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review”, March, 2022.Available:<https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0301479722004996>.DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114926>
- [7] S. B. C. Malca, “Influencia de la mezcla del romerillo con material ligante arcilloso en la estabilización del afirmado del tramo: El Porvenir y el sector Tamboyacu, distrito Elías Soplín Vargas, Rioja - San Martín, 2017”, Moyobamba: Repositorio Público Universidad Cesar Vallejo, 2018.
- [8] T. T. Cesar, "Diseño de la capa de rodadura con material romerillo y la adición de melaza de caña para su uso en la vía baños sulfurosos - Shucshuyacu, distrito de Jepelacio, Moyobamba – 2020", Moyobamba: Repositorio Público Universidad Cesar Vallejo, 2020.
- [9] G. G. Graciela et al, "Utilización del agregado romerillo en el diseño del concreto  $f'c = 280\text{kg/cm}^2$  para elevar la resistencia mecánica a compresión, Rioja, 2022" Tarapoto: Repositorio Público Universidad Cesar Vallejo, 2022.
- [10] C. T. Rosa et al, " Efecto de la melaza y carbón molido en la estabilización de subrasante en vía no pavimentada, distrito de Laredo, Trujillo", Trujillo: Repositorio Público Universidad Cesar Vallejo, 2021.

- [11] G. M, Carlos, “Estabilización Química de Carreteras no Pavimentadas en el Perú y Ventajas Comparativas del Cloruro de Magnesio (Bischofita) Frente al Cloruro De Calcio”, (Tesis de pregrado). Universidad Ricardo Palma, Perú, 2010.
- [12] R. Zapata and S. Angelone, “TIPOS DE SUELOS: CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS Y LIMOSOS,” 2018. Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: <https://acortar.link/aZqeXs>
- [13] L. A. José, PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS, 1ª edición, 2015, pp 1-90.
- [14] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS SECCIÓN SUELOS Y PAVIMENTOS. Lima, 2014. [Online]. Available: [www.mtc.gob.pe](http://www.mtc.gob.pe)
- [15] MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES, MANUAL DE ENSAYO DE MATERIALES, Lima: RD N°18-2016-MTC/14, 2016.
- [16] M. D. Braja, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Cuarta ed., México: Cengage Learning Editores, S.A., 2015, pp. 78-87.
- [17] MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES, MANUAL DE CARRETERAS, SUELOS GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS - SECCIÓN SUELOS Y PAVIMENTOS, Lima: R.D. N°10-2014-MTC/14, 2014, p. 9.
- [18] Y. Ninanya Sánchez, “EFECTOS DE LA DIATOMITA EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS PARA SUBRASANTE,” Universidad Peruana Los Andes, Huancayo, 2021.
- [19] L. M. Daza et al, “Preparación y Caracterización de Carbones Activados a partir de un Carbón Mineral de la Cuenca del Cesar (Colombia)”, Rev. politec., vol. 14, n.º 26, pp. 75–88, ago. 2018.
- [20] MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. Manual De Ensayo De Materiales. Perú, 2016.
- [21] K, Víctor, "Soil Mechanics. Calculations, Principles, and Method". Estados Unidos: Newark 1ra edición, 2017, pp. 462. ISBN: 9780128014844
- [22] T. M. Torres, “Estabilización de suelos cohesivos utilizando escoria de cobre para su uso como subrasante mejorada”, para obtener el título profesional de ingeniero civil, UNI, Lima, 2019.
- [23] Y. Espinosa Morales, “La fluorescencia de rayos x (FRX) como técnica de análisis en bienes culturales”.
- [24] Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, *Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito*, Lima, Perú: MTC, 2008. Aprobado por Resolución Ministerial N.º305-2008-TC/02.[En línea]. Disponible en: <https://servilex.pe/documents/ambiente/rm305-2008-mtc-anexo.pdf>

Anexos

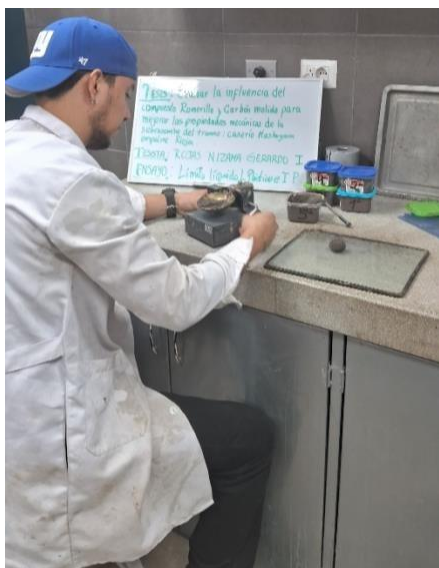
Anexo N°1: PANEL FOTOGRÁFICO



*Ilustración 13: Contenido de Humedad*



*Ilustración 14: Granulometría Por Tamizado*



*Ilustración 15: Límites De Consistencia*



*Ilustración 16: Gravedad Específica*





*Ilustración 17: Proctor Modificado*



Ilustración 18: CBR Natural



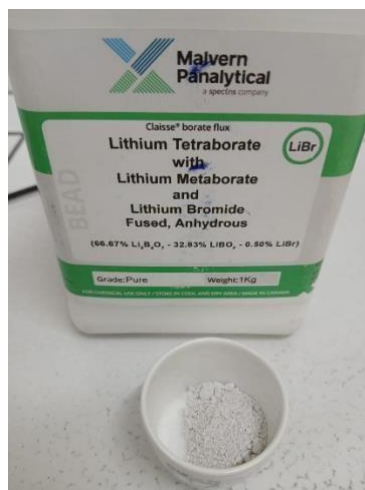
*Ilustración 19: Tierra natural + mezcla de Romerillo y Carbón molido*

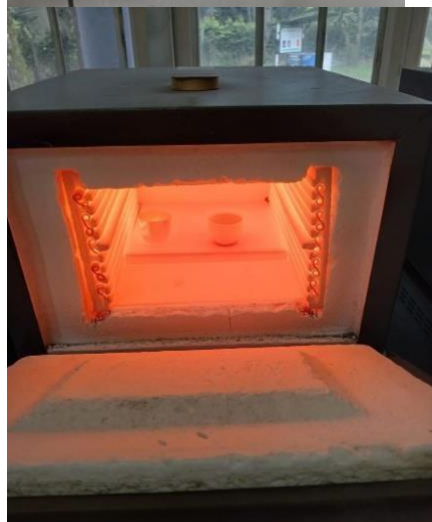
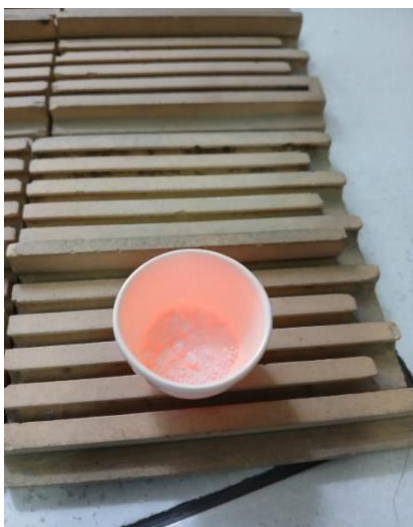
## ANEXO N° 02:

## ENSAYO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X – MATERIAL ROMERILLO (MODELO DE ENSAYO SIN CERTIFICACIÓN)

**EMPRESA: CEMENTOS SELVA S.A.**

Results	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Cuantitativo</b>	
Suma	100.7143 %
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Medida</b>	
Aplicación	CEMOXI_SELVA
Tipo	Routine
Muestra	CLZA IVAN
Fecha & Hora	31/05/2024 22:49:05
Archivo	CEMOXI_SELVA
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Concentraciones</b>	
SiO <sub>2</sub> _	98.20 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _	0.16 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _	0.06 %
CaO_	0.05 %
MgO_	-0.03 %
SO <sub>3</sub> _	0.05 %
K <sub>2</sub> O_	0.03 %
Na <sub>2</sub> O_	-0.201 %
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _	0.001 %
TiO <sub>2</sub> _	0.205 %
ZnO_	0.000 %
SrO_	0.001 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> _	0.014 %
PF	0.890 %
FC	0.991 %
SUMA_	99.426 %





**Anexo N°03:**

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL



**Asunto:** Solicitud de Retiro de Romerillo de la Cantera Gárate

Estimada empresa Cantera Gárate,

Espero que este mensaje le encuentre bien. Me dirijo a usted en calidad como estudiante **Gerardo Ivan Rojas Nizama**, identificado con el DNI N° **71490942** de la **Universidad Santo Toribio de Mogrovejo (USAT)** con respecto a una solicitud para el retiro de Romerillo de su cantera.

Como parte de mi proyecto actual **TESIS** para obtener el título como Ing. Civil, requiero una cantidad específica de afirmado para llevar a cabo previos ensayos de manera efectiva y eficiente. Hemos evaluado varias fuentes y creemos que su cantera proporciona la calidad y cantidad de material que necesitamos para cumplir con nuestros estándares.

Por lo tanto, solicitamos formalmente su permiso para retirar el debido romerillo de su cantera. Nos comprometemos a cumplir con todas las regulaciones y procedimientos establecidos por su empresa, así como con las leyes y regulaciones gubernamentales pertinentes relacionadas con la extracción de material de su propiedad.

A continuación, detallamos algunos puntos relevantes:

1. Cantidad requerida: 8 kg de Romerillo.
2. Retiro: 30/04/2024, si el caso responde óptimo.

Agradecemos de antemano su consideración de nuestra solicitud y esperamos poder llegar a una respuesta favorable. Quedamos a la espera de su respuesta.

Atentamente,

**Gerardo Ivan Rojas Nizama**

Rojas Nizama Gerardo Ivan  
DNI N° 71490942

**ANEXO N° 04:**

**VERIFICACIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL LABORATORIO –  
USAT - PARTICULAR**

**(ADJUNTADO EN LINK DE DRIVE)**

**[https://drive.google.com/drive/folders/1Rt0uOBfK5Go5petPirnX\\_jNKZwKb\\_XmL?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1Rt0uOBfK5Go5petPirnX_jNKZwKb_XmL?usp=sharing)**