

Efecto de cenizas de semilla de palta, durazno y fibra de sisal en el comportamiento de una subrasante arcillosa

Effect of avocado and peach seed ashes and sisal fibre on the performance of clayey subgrade

Fecha de entrega: 9 de mayo 2025

Fecha de aceptación: 4 de julio 2025

Deyvi Franklin Calizaya, Jhonatan Jesús Mamani y Marco Herber Muñiz

Universidad Cesar Vallejo Trujillo, Perú, decalizayama@ucvvirtual.edu.pe (<https://orcid.org/0009-0004-9967-3965>), jhmamanini@ucvvirtual.edu.pe (<https://orcid.org/0009-0005-3306-091X>), mmunizp@ucvvirtual.edu.pe (<https://orcid.org/0000-0002-6818-6097>)

Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de cenizas de semilla de palta (CSP), durazno (CSD) y fibra de sisal (FS) en las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos, buscando determinar su viabilidad como aditivos estabilizantes en aplicaciones viales sostenibles. Los ensayos realizados incluyeron pruebas de plasticidad, compactación mediante el método Proctor modificado y capacidad portante evaluada a través del California bearing ratio (CBR). En los resultados de plasticidad, el índice de plasticidad (IP) se redujo hasta 15%. Para la compactación, la máxima densidad seca (MDS) alcanzó un valor de 1.83 g/cm³ con un contenido óptimo de humedad (OH) de 16.2%, mostrando una mejora en la cohesión interna del suelo. Finalmente, en cuanto a la capacidad portante, los valores del CBR mostraron un aumento máximo de hasta 21.6% al 100% de MDS Proctor, lo cual valida la eficiencia de los aditivos para incrementar la resistencia del suelo bajo carga. En conclusión, los resultados obtenidos respaldan la aplicación de CSP, CSD y FS como aditivos que mejoran la plasticidad, compactación y capacidad portante del suelo arcilloso, ofreciendo una alternativa técnica y ambientalmente sostenible para infraestructuras viales mediante el aprovechamiento de subproductos agroindustriales.

Palabras clave: estabilización, cenizas, fibra, compactación, CBR, arcilla

The objective of this study was to evaluate the effect of avocado seed ashes (CSP), peach (CSD) and sisal fiber (FS) on the geotechnical properties of clayey soils, seeking to determine their viability as stabilizing additives in sustainable road applications. The tests performed included plasticity tests, compaction by the modified Proctor method and bearing capacity evaluated through the California bearing ratio (CBR). In the plasticity results, the plasticity index (PI) was reduced by up to 15%, which demonstrated the effectiveness of the additives in reducing expansion and improving soil cohesion. For compaction, the maximum dry density (MDS) reached a value of 1.83 g/cm³ with an optimum moisture content (OH) of 16.2%, showing an improvement in the internal cohesion of the soil. Finally, regarding bearing capacity, the CBR values showed a maximum increase up to 21.6% at 100% of Proctor MDS, which validates the efficiency of the additives to increase soil strength under load. In conclusion, the results obtained support the application of CSP, CSD and FS as additives that improve the plasticity, compaction and bearing capacity of clayey soils, offering a technically and environmentally sustainable alternative for road infrastructures through the use of agroindustrial by-products.

Keywords: stabilization, ash, fibre, compaction, CBR, clay

Introducción

Los suelos arcillosos y arenosos de baja capacidad de soporte influenciada por el contenido de humedad, representan un desafío en la infraestructura vial. La presencia de humedad puede generar problemas como hundimientos y asentamientos que se acentúan en suelos arcillosos

expansivos durante temporadas lluviosas, aumentando en función de su contenido de agua (López-Niño *et al.*, 2023; Rodríguez, 2020). En invierno, el congelamiento del agua en el suelo agrava estos problemas, comprometiendo la estabilidad y durabilidad de las vías (Gidebo *et al.*, 2023).



Tradicionalmente, la ingeniería civil ha abordado estos problemas mejorando la calidad de la subrasante mediante el uso de materiales de préstamo o la adición de productos industriales para incrementar la capacidad de soporte (Chauca, 2024). Sin embargo, en la última década, ha crecido el interés por soluciones más sostenibles y ambientalmente responsables (Cypher Environmental¹; Condori y Gutiérrez, 2024; Sengul *et al.*, 2013). La estabilización de suelos mediante residuos orgánicos, como cenizas y fibras naturales, es una línea de investigación emergente que busca aprovechar subproductos agrícolas, como las cenizas de semillas de palta y durazno, así como la fibra de sisal. Estos aditivos no solo mejoran la cohesión y la capacidad de soporte de los suelos, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y reducción del impacto ambiental (Vettorelo y Clariá, 2014; Villarroel-Ortega *et al.*, 2022).

La estabilización de suelos arcillosos problemáticos para aplicaciones viales enfrenta una serie de limitaciones que dificultan su efectividad y aplicación práctica. Estos suelos, caracterizados por su alta plasticidad y su susceptibilidad a cambios volumétricos, representan un desafío significativo para la infraestructura vial debido a sus propiedades geotécnicas adversas (Afzali y Sharma, 2023; López-Niño *et al.*, 2023; Villarroel-Ortega *et al.*, 2022).

Una de las principales problemáticas es la heterogeneidad de los materiales estabilizantes empleados, como las cenizas de residuos industriales o las fibras de refuerzo. La composición química de estos materiales varía según su origen y procesos de producción, lo que afecta la uniformidad de los resultados al aplicarlos en suelos arcillosos. Por ejemplo, el residuo de carburo de calcio (CCR), ampliamente utilizado como estabilizante, presenta un alto contenido de Ca(OH)_2 y propiedades similares a la cal. Sin embargo, su variabilidad composicional puede limitar la eficacia del tratamiento al generar inconsistencias en la mejora de las propiedades mecánicas y la estabilidad hídrica del suelo estabilizado (Gong *et al.*, 2022).

Las propiedades específicas de los suelos, como su mineralogía y contenido de humedad, influyen en su respuesta al tratamiento estabilizador. En algunos casos,

los suelos altamente plásticos pueden mostrar una mejora insuficiente o incluso negativa al interactuar con los materiales estabilizantes, lo que exige ajustes en las proporciones y metodologías de aplicación (Luo *et al.*, 2023).

Estudios recientes han demostrado que el uso de fibras naturales puede mejorar la resistencia y estabilidad de los suelos (Villarroel-Ortega *et al.*, 2022). En este contexto, la investigación propuesta evalúa el efecto de estos aditivos naturales en las propiedades geotécnicas de los suelos arcillosos viales. El objetivo es analizar cómo estos componentes contribuyen a optimizar la compactación, reducir el índice de plasticidad y aumentar la capacidad de soporte de suelos de baja resistencia (Anburuvel, 2023). Con ello se busca no solo mejorar la infraestructura vial, sino también promover prácticas de construcción eco-amigables, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Metodología

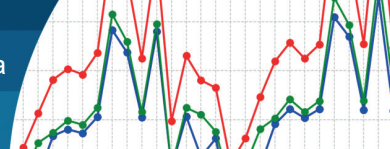
Esta investigación sigue un diseño experimental de tipo cuantitativo, orientado a evaluar la influencia de cenizas de semilla de palta (CSP), durazno (CSD) y fibra de sisal (FS) en las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos viales de Moquegua, 1144 km al sur de Lima, Perú. Esta investigación aplicada tiene el propósito de estabilizar suelos mediante aditivos orgánicos y de origen agroindustrial. Este enfoque permite observar los efectos en las propiedades físicas y mecánicas del suelo, promoviendo soluciones sostenibles en la ingeniería vial.

Selección y preparación de muestras

Se seleccionó un suelo arcilloso característico de la región de Moquegua. La extracción se realizó en tres puntos de muestreo críticos de vías no pavimentadas en calicatas de 3 m de profundidad. Las muestras fueron secadas al ambiente y tamizadas para asegurar homogeneidad granulométrica. Se añadieron cenizas y fibras en proporciones del 3, 5 y 8% del peso del suelo seco, manteniendo control en la preparación de cada mezcla para los ensayos.

Mediante los ensayos de límites de Atterberg (ASTM D4318, 2017), se evaluaron los límites líquido y plástico del suelo natural y las mezclas con aditivos. Este ensayo permitió determinar la capacidad del suelo para retener

¹ <https://cypherenvironmental.com/2022/07/08/building-strong-and-stable-clay-roads>



agua sin perder estabilidad. Se utilizó el ensayo Proctor modificado (ASTM D1557, 2021) para obtener la Máxima Densidad Seca (MDS) y el Contenido Óptimo de Humedad (OH). Las muestras fueron compactadas en moldes cilíndricos de 152.4 mm (6 pulgadas) en cinco capas, aplicando 25 golpes de compactación por capa, a fin de evaluar como cada aditivo influye en la capacidad de compactación del suelo. El ensayo de relación de soporte California CBR (ASTM D1883, 2021) permitió evaluar la capacidad de soporte del suelo bajo condiciones de carga. Las muestras compactadas en condiciones óptimas fueron sometidas a una penetración controlada de 1.27 mm/min (0.05 in/min), registrando los valores de presión CBR a profundidades de 2.54 mm y 5.08 mm (0.1 y 0.2 pulgadas) para establecer la dosificación óptima en términos de soporte estructural. La Figura 1 presenta un flujograma de las etapas de la investigación.

Los datos se analizaron aplicando pruebas de hipótesis y análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia de los cambios en las propiedades del suelo.

Resultados

Las Figuras 2 y 3 muestran semillas de palta fuerte y ceniza de palta, respectivamente, las cuales fueron utilizadas en los ensayos. La Figura 4 muestra resultados del análisis químico de la ceniza de semilla de palta fuerte.



Figura 2: Semilla de palta fuerte



Figura 3: Ceniza de semilla de palta fuerte

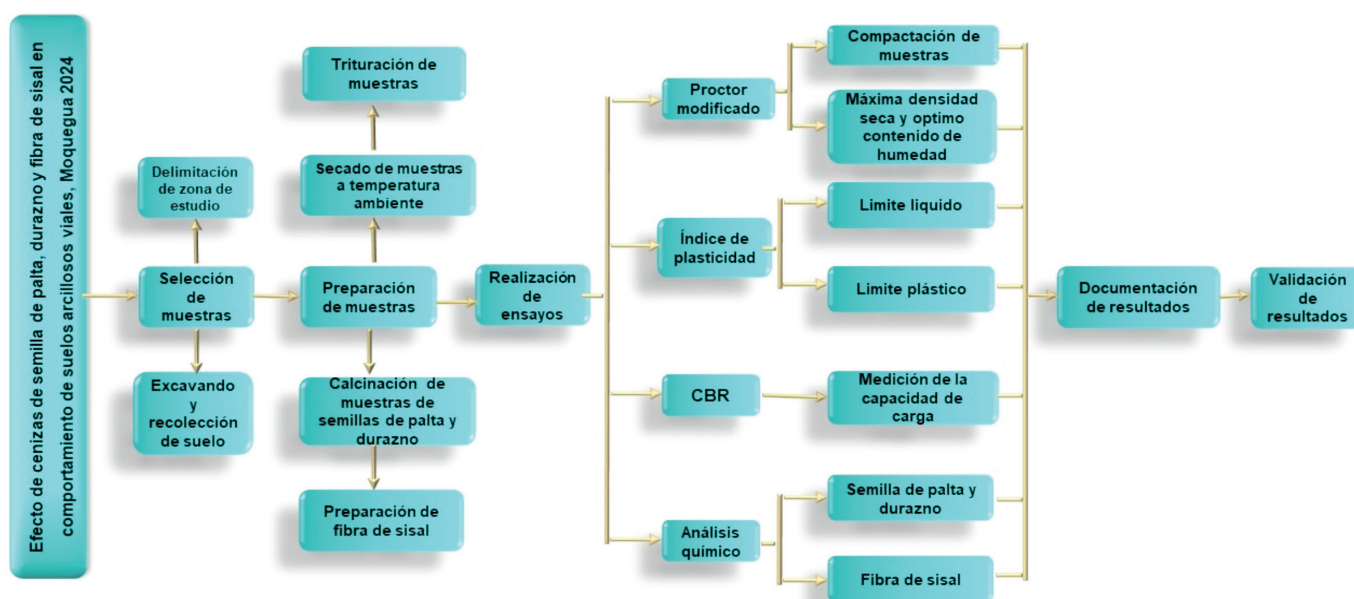


Figura 1: Flujograma de las etapas de la investigación

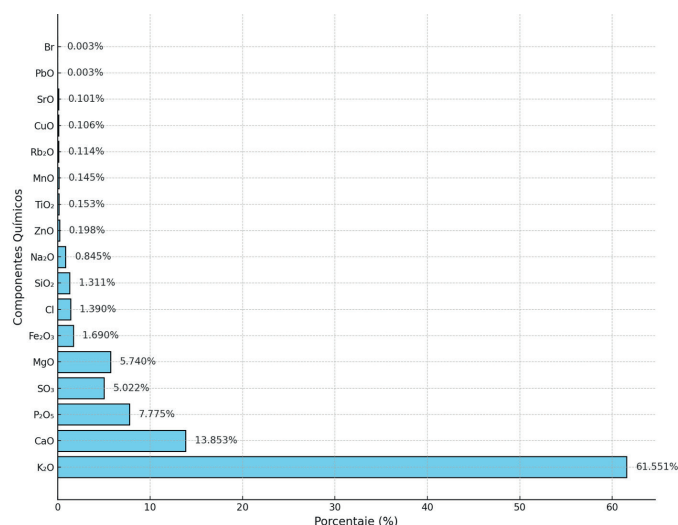


Figura 4: Componentes químicos de ceniza de semilla de palta fuerte

La gráfica presentada en la Figura 4 destaca la composición química de la ceniza de semilla de palta fuerte (CSP), mostrando claramente la predominancia de ciertos óxidos y elementos químicos en su estructura. El óxido de potasio (K_2O) es el componente mayoritario con un porcentaje del 61.6%, lo que indica que esta ceniza tiene un alto contenido alcalino. Este factor es crucial porque los materiales ricos en potasio suelen influir en la capacidad de reacción química cuando se incorporan a mezclas de suelos, concretos o morteros, contribuyendo potencialmente a la estabilización de suelos arcillosos o a la activación de propiedades puzolánicas.

El segundo componente más abundante es el óxido de calcio (CaO), con un 13.9%. Este es un dato técnico relevante, ya que el calcio es un componente clave en procesos de estabilización de suelos mediante la formación de compuestos cementantes, como los silicatos y aluminatos de calcio, cuando reacciona con otros elementos presentes en el medio. Su presencia en estas proporciones sugiere que la CSP puede actuar como un agente químico efectivo en aplicaciones de mejoramiento de suelos.

Otros componentes, como el óxido de fósforo (P_2O_5) con un 7.8% y el óxido de azufre (SO_3) con un 5.0%, también juegan un rol importante. El fósforo puede influir en las reacciones de endurecimiento, mientras que el azufre podría tener implicaciones tanto positivas como negativas dependiendo del sistema en el que se utilice, particularmente en la durabilidad frente a la formación de sulfatos.

El contenido menor de óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de magnesio (MgO) y óxido de silicio (SiO_2) también puede ser significativo. Aunque sus porcentajes son relativamente bajos (1.7%, 5.7% y 1.3%, respectivamente), estos compuestos pueden influir en las propiedades mecánicas y químicas del sistema en el que se incorpora la ceniza, actuando como elementos estabilizadores secundarios o como rellenos reactivos.

Las Figuras 5 y 6 muestran semillas de durazno blanco y ceniza de durazno, respectivamente, las cuales fueron utilizadas en los ensayos y la Figura 7 muestra resultados del análisis químico de la ceniza de semilla de durazno.

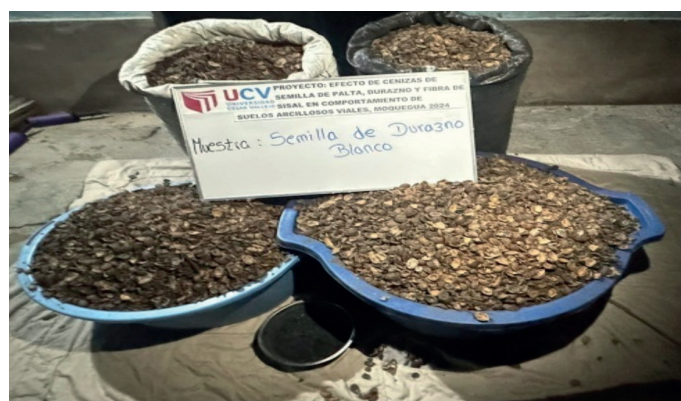


Figura 5: Semilla de durazno blanco

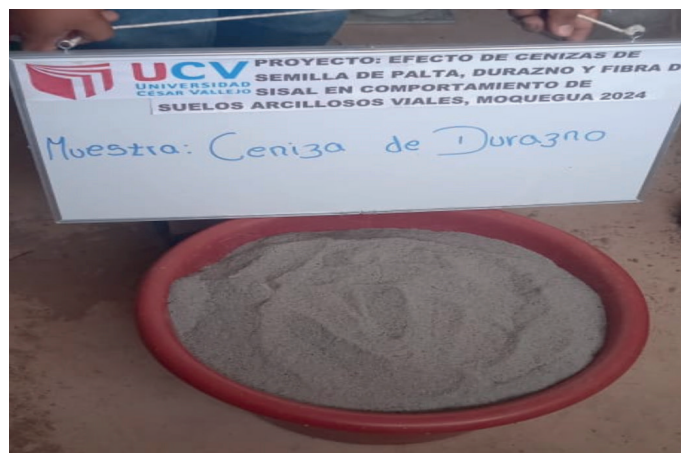


Figura 6: Ceniza de semilla de durazno blanco

La composición química de la ceniza de semilla de durazno blanco destaca la predominancia del óxido de potasio (K_2O) y el óxido de calcio (CaO), los cuales representan el 38.2% y el 26.8% del total, respectivamente. Estas concentraciones indican que la ceniza tiene un carácter alcalino significativo, lo que la posiciona como un material con alto potencial reactivo. El óxido de potasio, al ser el

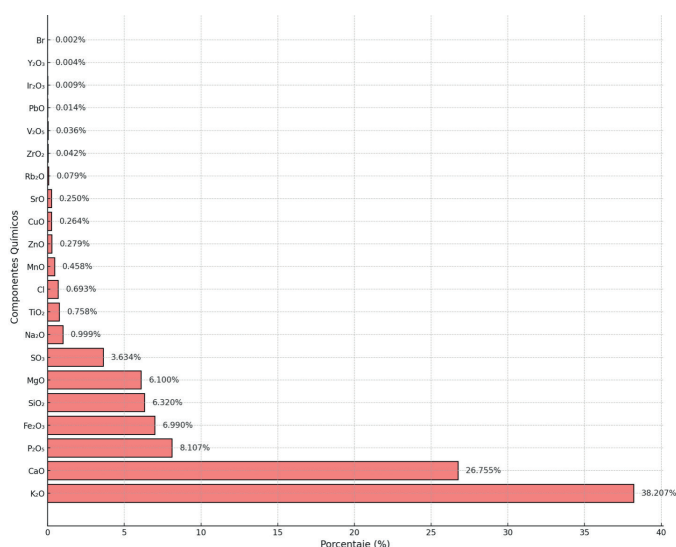
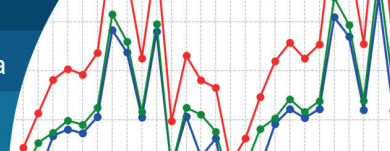


Figura 7: Componentes químicos de semilla de durazno blanco

componente principal, podría influir positivamente en las reacciones químicas del suelo o mezclas cementantes, mientras que el óxido de calcio es esencial para la formación de compuestos cementantes como los silicatos y aluminatos de calcio, que mejoran la estabilidad estructural y la cohesión de los materiales tratados. Entre los óxidos secundarios, el óxido de fósforo (P_2O_5) y el óxido de hierro (Fe_2O_3), con porcentajes de 8.1% y 7.0%, respectivamente, aportan propiedades específicas que pueden fortalecer la resistencia mecánica del material. Adicionalmente, el óxido de silicio (SiO_2) y el óxido de magnesio (MgO), ambos presentes en cantidades similares (6.3% y 6.1%), añaden propiedades puzolánicas y contribuyen a la estabilidad química, reforzando la capacidad de la ceniza para actuar como un aditivo efectivo en mezclas de suelos y cementos.

El óxido de azufre (SO_3), con un 3.6%, también juega un papel relevante, ya que puede influir en la durabilidad y la resistencia química del material frente a procesos como la formación de sulfatos. Aunque otros componentes, como Na_2O , TiO_2 y Cl , están presentes en menores proporciones, su influencia en las reacciones químicas generales no debe subestimarse, ya que pueden complementar el efecto estabilizador. Finalmente, los elementos traza como MnO , ZnO , CuO y SrO , aunque en cantidades menores al 1%, podrían actuar como catalizadores o aportar pequeñas mejoras en propiedades específicas del suelo o mezclas tratadas. En conjunto, esta composición química sugiere que la ceniza de semilla de durazno blanco tiene un gran potencial como estabilizador de suelos arcillosos y

aditivo en materiales de construcción, destacándose por su capacidad para mejorar propiedades como la plasticidad, cohesión y resistencia mecánica.

En lo que respecta al análisis de la fibra de sisal, las Figuras 8 y 9 muestran la planta y la fibra extraída de sisal utilizada en los ensayos. La Figura 10 presenta los porcentajes de los componentes químicos presentes en la fibra de sisal.

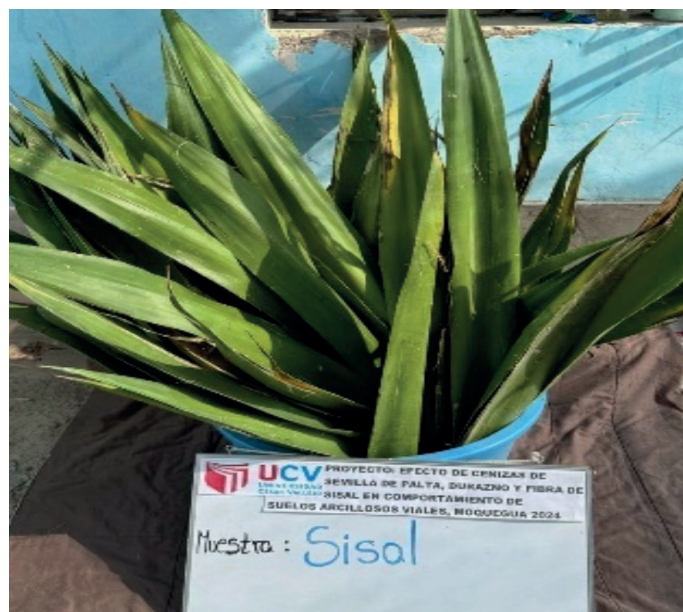


Figura 8: Planta sisal



Figura 9: Fibra de sisal

La fibra de sisal, según su composición química, se presenta como un material excepcional para aplicaciones en ingeniería civil, especialmente en la estabilización de suelos y el refuerzo de materiales constructivos. Su mayor componente, el óxido de calcio (CaO), representa el 46% del total y actúa como un elemento clave para la

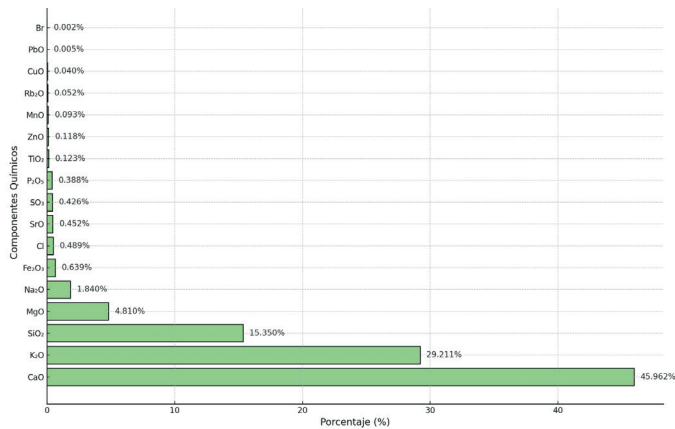
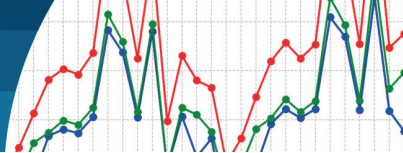


Figura 10: Componentes químicos de fibra de sisal

formación de compuestos cementantes, como los silicatos y aluminatos de calcio, esenciales para incrementar la cohesión y resistencia de suelos y mezclas cementantes. Esta alta concentración de CaO posiciona a la fibra de sisal como un estabilizador químico de alto rendimiento, particularmente eficaz en suelos con alta plasticidad. El óxido de potasio (K₂O), con un 29.2%, aporta un carácter alcalino significativo al material, lo que incrementa su reactividad en entornos químicos y mejora la estabilidad del suelo tratado frente a variaciones ambientales como humedad y temperatura. Junto a este, el óxido de silicio (SiO₂), que representa el 15.4%, contribuye con propiedades puzolánicas moderadas que refuerzan la durabilidad y compactación del suelo. Al reaccionar con el CaO, el SiO₂ facilita la formación de compuestos adicionales que aumentan la estabilidad y resistencia de las mezclas tratadas.

Entre los componentes secundarios, el óxido de magnesio (MgO), con un 4.8%, complementa las funciones del CaO al mejorar la durabilidad y compacidad del material. Aunque en menor proporción, el óxido de sodio (Na₂O) y el óxido de hierro (Fe₂O₃) también desempeñan roles específicos: el primero potencia las reacciones alcalinas, mientras que el segundo refuerza las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica, lo que es particularmente útil en aplicaciones de alta carga.

Finalmente, trazas de elementos como el cloro Cl, óxido de azufre SO₃, óxido de fósforo P₂O₅ y otros óxidos menores aportan beneficios adicionales, como la mejora de la cohesión y la resistencia química del material. Aunque presentes en bajas concentraciones, estos componentes pueden actuar como catalizadores o modificadores de propiedades específicas, optimizando el rendimiento del material en diferentes contextos.

Suelos naturales

La Figura 11 muestra las curvas granulométricas de las muestras extraídas de las calicatas C-1, C-2, C-3 y C-4. Estas calicatas representan la zona de estudio mediante la exploración a cielo abierto.

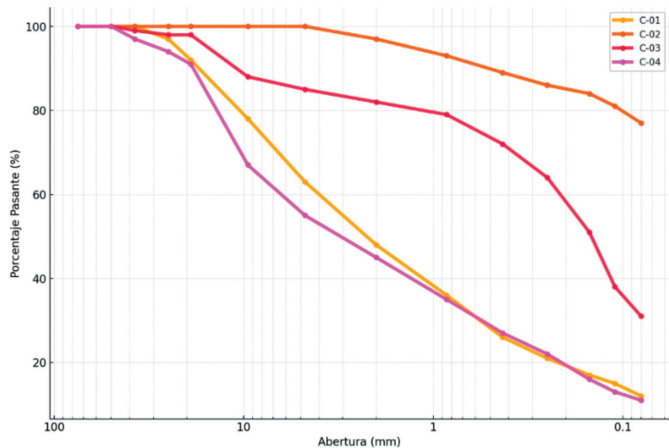
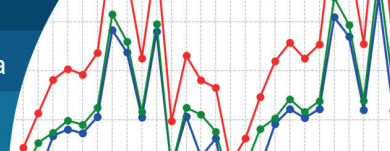


Figura 11: Curvas granulométricas de las muestras C-01, C-02, C-03 y C-04

Las curvas granulométricas de las muestras C-01, C-02, C-03 y C-04 evidencian variaciones significativas en la distribución de tamaños de partículas, reflejando diferencias en sus características texturales. Las muestras C-02 y C-03 presentan una mayor proporción de partículas finas, lo cual se traduce en un porcentaje pasante elevado en las mallas más finas. Esta tendencia sugiere que estas muestras están compuestas predominantemente por materiales de grano fino, como limos o arcillas, que suelen estar asociados con una alta plasticidad y baja permeabilidad.

En contraste, las muestras C-01 y C-04 muestran un comportamiento opuesto, con una mayor cantidad de partículas gruesas. Esto se observa en una caída más abrupta del porcentaje pasante conforme disminuye el tamaño de las mallas, lo que indica una granulometría más gruesa, típica de suelos arenosos o gravosos. Esta distribución implica que estos suelos pueden ofrecer mayor permeabilidad y menor cohesión en comparación con las muestras más finas.

En general, las curvas granulométricas reflejan un rango textural que varía desde suelos predominantemente finos (C-02 y C-03), caracterizados por una mayor retención de agua y menor estabilidad estructural, hasta suelos con una fracción más significativa de partículas gruesas (C-01 y C-04), que presentan mejor drenaje y mayor estabilidad



mecánica. Estas diferencias texturales son fundamentales para definir la aplicabilidad de cada tipo de suelo en proyectos de ingeniería específicos.

La Figura 12 muestra los resultados de los límites de consistencia de los suelos analizados.

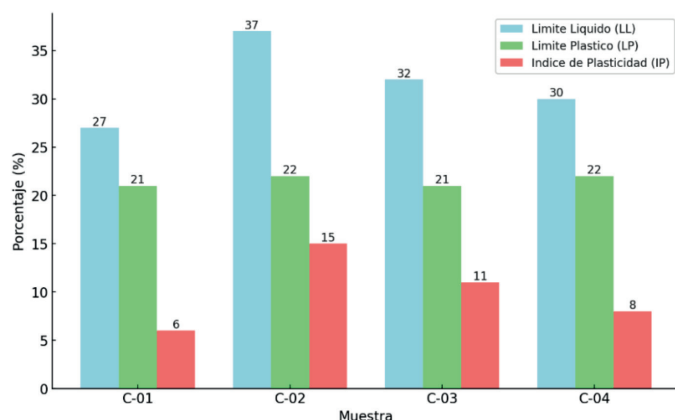


Figura 12: Límites de consistencia de las muestras C-01, C-02, C-03 y C-04

Las muestras C-01 a C-04 presentan variaciones significativas en sus límites de consistencia, lo que refleja diferencias en el comportamiento mecánico y plástico de los suelos analizados. En términos del índice de plasticidad IP, la muestra C-02 destaca con el valor más alto, alcanzando 15. Esto indica que este suelo tiene una mayor capacidad de deformación antes de fracturarse, lo que sugiere una alta plasticidad asociada a un contenido considerable de partículas finas, como arcillas. En contraste, la muestra C-01 presenta el IP más bajo, con un valor de 6, lo que implica un suelo menos plástico y, por ende, más rígido y con menor capacidad de deformación.

El límite líquido LL muestra una variación entre 27 y 37, siendo nuevamente la muestra C-02 la que requiere el mayor contenido de agua para alcanzar el estado líquido, lo que refuerza su carácter más plástico y cohesivo. Este comportamiento está relacionado con una mayor afinidad por el agua, típica de suelos con alto contenido de partículas finas. Por otro lado, las muestras con un LL más bajo, como C-01, indican menor capacidad de retener agua antes de entrar en un estado de fluidez.

En cuanto al límite plástico LP, se mantiene constante entre 21 y 22 para todas las muestras, lo que sugiere que el suelo comienza a experimentar deformación plástica bajo condiciones similares, independientemente de las

variaciones en el índice de plasticidad o el límite líquido. Esto podría deberse a una composición mineralógica común en todas las muestras, a pesar de las diferencias en su distribución granulométrica o contenido de agua.

Prosiguiendo con el ensayo Proctor modificado, las muestras C-01 a C-04 muestran diferencias notables en los resultados del ensayo Proctor modificado, reflejando variaciones en sus características de compactación y comportamiento bajo condiciones controladas. La muestra C-04 destaca como la más densa, alcanzando una densidad seca máxima de 2.23 g/cm^3 y un peso unitario de 21.9 kN/m^3 , lo que indica una excelente compactación y resistencia estructural bajo condiciones óptimas. Este comportamiento sugiere que C-04 tiene una granulometría y composición que favorecen una densificación eficiente con menor inclusión de aire, haciéndola ideal para aplicaciones que requieran alta estabilidad. En contraste, la muestra C-02 presenta la densidad seca más baja de 1.75 g/cm^3 , acompañada del mayor contenido de humedad óptima, 18.5% . Este resultado implica que C-02 necesita una mayor cantidad de agua para alcanzar su máxima compactación, lo cual podría estar relacionado con un contenido elevado de partículas finas que aumentan su capacidad de retención de agua. Este comportamiento sugiere que este tipo de suelo es menos eficiente en términos de compactación y podría ser más sensible a variaciones de humedad. Las muestras C-01 y C-03 presentan valores intermedios tanto en densidad seca como en humedad óptima, lo que indica una compactación moderada y un requerimiento de agua menor en comparación con C-02. Este rango intermedio sugiere que ambos suelos tienen características más equilibradas, combinando estabilidad mecánica con una compactación relativamente eficiente.

Los resultados de ensayos CBR en las muestras C-01, C-02, C-03 y C-04 se presentan en la Figura 13.

Los resultados del ensayo CBR evidencian diferencias claras y significativas en la resistencia mecánica de las muestras C-01 a C-04. La muestra C-01 se destaca con un $\text{CBR} = 119.8\%$ al 100% de la MDS Proctor (2.54 mm , 0.1 pulgadas de penetración del pistón), posicionándola como el suelo más resistente del grupo. Este alto valor indica que tiene una excelente cohesión interna y una estructura capaz de soportar cargas significativas con mínimas deformaciones. Estas características la hacen ideal para

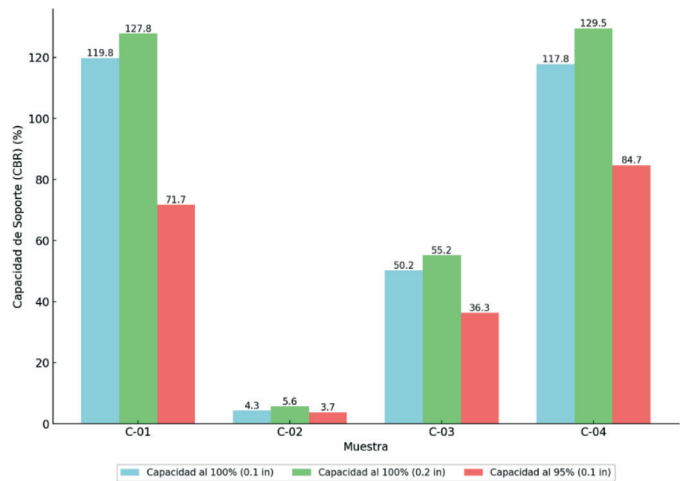
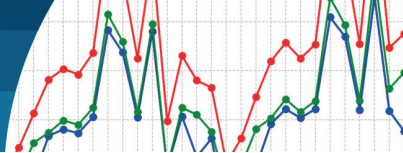


Figura 13: Ensayo CBR en las muestras C-01, C-02, C-03 y C-04

aplicaciones que requieren una alta capacidad portante, como capas de base en pavimentos sometidos a tráfico pesado. Muy cerca de C-01, la muestra C-04 también alcanza un alto CBR = 117.8%, mostrando un desempeño igualmente sobresaliente, lo que la convierte en otra opción confiable para proyectos donde se priorice la estabilidad estructural y la resistencia.

En contraste, la muestra C-02 exhibe un valor de soporte significativamente menor, alcanzando solo un CBR = 4.3%. Este resultado refleja un suelo con una estructura débil, baja cohesión y alta deformabilidad bajo carga. En su estado actual, C-02 no es adecuado para aplicaciones que exijan una alta capacidad portante, por lo que

requeriría estabilización química o mecánica para mejorar su desempeño.

Por su parte, la muestra C-03 muestra un comportamiento intermedio, con un CBR = 50.2%. Este valor, aunque considerablemente menor que el de C-01 y C-04, sugiere que podría ser utilizado en proyectos con demandas de carga moderadas, donde la resistencia mecánica no sea el factor más crítico.

En la evaluación al 95% de MDS del Proctor, la tendencia general se mantiene, aunque con valores ligeramente más bajos debido a la menor compactación alcanzada. Las muestras C-01 y C-04 continúan destacándose como los suelos más adecuados, mientras que C-03 conserva su desempeño intermedio y C-02 se confirma como el menos apto para aplicaciones exigentes.

Suelo con cenizas y fibras

Se realizó un estudio para analizar el efecto de la incorporación de cenizas de semilla de palta CSP, cenizas de semilla de durazno CSD y fibra de sisal FS en las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso C-02. Este análisis se centró específicamente en tres aspectos clave: la plasticidad, la capacidad de compactación y la capacidad portante del suelo. En la Figura 14 se muestra la variación de los límites de consistencia con la dosificación de ceniza y fibra.

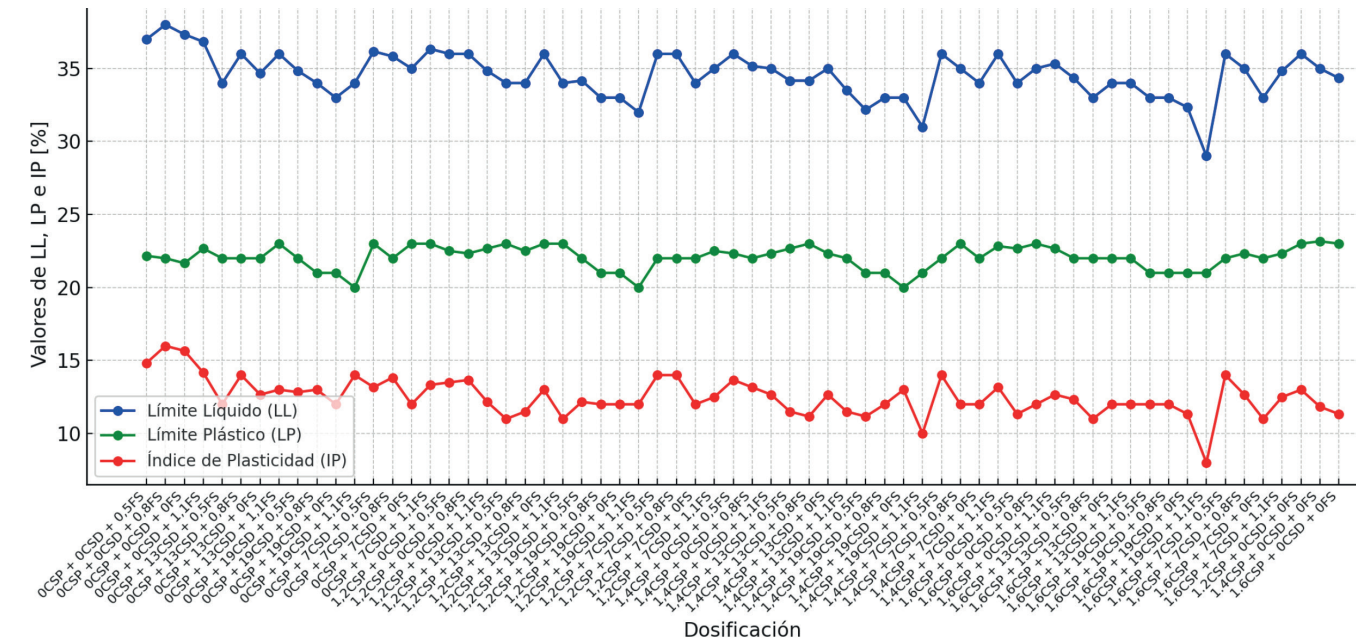
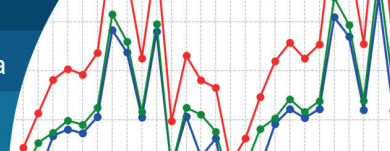


Figura 14: Límites de plasticidad en suelo arcilloso con dosificaciones de CSP+CSD+FS



Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de aditivos como las cenizas de semilla de palta CSP y de durazno CSD genera una disminución en el índice de plasticidad IP de los suelos arcillosos. Este indicador es crucial porque refleja la capacidad del suelo para cambiar de forma en respuesta a la humedad. En este caso, el tratamiento con una dosificación óptima de 5% de CSP y 3% de CSD redujo el IP de un 17% a aproximadamente un 15%. Esta disminución implica que el suelo tratado se vuelve menos sensible a las variaciones de humedad, lo que lo hace más estable y menos propenso a deformaciones. En términos prácticos, esta mejora se traduce en un suelo más cohesivo y adecuado para soportar cargas, lo que beneficia directamente su uso en aplicaciones geotécnicas, como cimientos, carreteras y terraplenes.

El análisis ANOVA confirmó la significancia estadística de estos resultados, con un valor $F = 49.52$ y un nivel de significancia extremadamente bajo (9.5×10^{-132}). Esto significa que la reducción observada en el IP no es un resultado aleatorio, sino que está directamente relacionada con las dosificaciones de los aditivos. La interpretación de estos valores estadísticos respalda que las cenizas de CSP y CSD tienen un impacto real y positivo en la mejora de las propiedades del suelo.

Los análisis de ensayos Proctor modificado de suelo arcilloso C-02 con CSP, CSD y FS se enfocan en determinar el efecto de las mismas adiciones en los parámetros de compactación del suelo. En su estado natural, el suelo evaluado C-02 mostró una MDS = 1.75 g/cm^3 y un OH = 18.5%. Con la adición de 15% de CSP, 15% de CSD y 2% de FS, se observó que la ceniza de semilla de palta CSP incrementó la MDS a 1.83 g/cm^3 , lo que representa un aumento absoluto de 0.08 g/cm^3 y relativo del 4.6%. Asimismo, el OH disminuyó a 16.2%, con una reducción absoluta de 2.3 puntos porcentuales y relativa del 12.4%. Este comportamiento evidencia una mayor densificación del suelo y una menor retención hídrica, efectos relacionados con las reacciones puzolánicas inducidas por los óxidos de potasio y calcio presentes en la CSP. Resultados similares fueron reportados por Cotrina (2023) con incrementos del 4.6% en MDS y disminuciones del 12.5% en OH al utilizar estabilizantes con características comparables.

En el caso de la ceniza de semilla de durazno CSD, la MDS aumentó a 1.81 g/cm^3 , representando un

incremento absoluto de 0.06 g/cm^3 (3.4%), mientras que el OH disminuyó a 16.8%, con una reducción absoluta de 1.7 puntos porcentuales (9.2%). Estos resultados son consistentes con los reportados por Langroudi *et al.* (2021), quienes documentaron un aumento del 3.3% en la MDS y una disminución del 10% en el OH al emplear estabilizantes similares.

Por último, las fibras de sisal FS incrementaron la MDS a 1.78 g/cm^3 , marcando un aumento absoluto de 0.03 g/cm^3 (1.7%), mientras que el OH disminuyó a 17.2%, con una reducción absoluta de 1.3 puntos porcentuales (7.0%). Este comportamiento concuerda con los resultados de Kamaruddin *et al.* (2019), quienes observaron un efecto estabilizador físico similar con fibras naturales, mejorando la interacción entre partículas y facilitando una compactación más eficiente.

Finalmente, en lo que respecta a las características del suelo relacionadas con su capacidad de soporte, se evaluó el impacto de las adiciones CSP, CSD y FS. La Figura 15 muestra el efecto de la incorporación en distintas proporciones de estos materiales en la capacidad portante del suelo arcilloso saturado, medida a través del ensayo de California bearing ratio CBR.

Los resultados del ensayo CBR evidenciaron un impacto notable de la incorporación de cenizas CSP, CSD y fibra FS en la mejora de la capacidad de soporte del suelo arcilloso C-02. En las pruebas realizadas, se analizaron los valores de CBR tanto al 95% como al 100% de la MDS Proctor (a una penetración de 2.54 y 5.08 mm), los cuales alcanzaron sus máximos en combinaciones específicas de aditivos.

Destacó particularmente la dosificación con un 5% de CSP y 3% de CSD, la cual logró un valor de CBR al 100% de penetración de hasta 21.6%. Este resultado representa una mejora sustancial en comparación con el suelo sin tratamiento C-02, el cual presentó un valor de 5.6%, casi 4 veces más bajos, reflejando una capacidad de soporte limitada. Este aumento en el CBR sugiere que los aditivos no solo incrementan la resistencia del suelo bajo cargas aplicadas, sino que también contribuyen a una mayor estabilidad estructural en condiciones de compactación.

El análisis estadístico mediante ANOVA confirmó la relevancia de estas mejoras. Con un valor $F = 6.6$ y una significancia de 6.9×10^{-31} , los resultados muestran

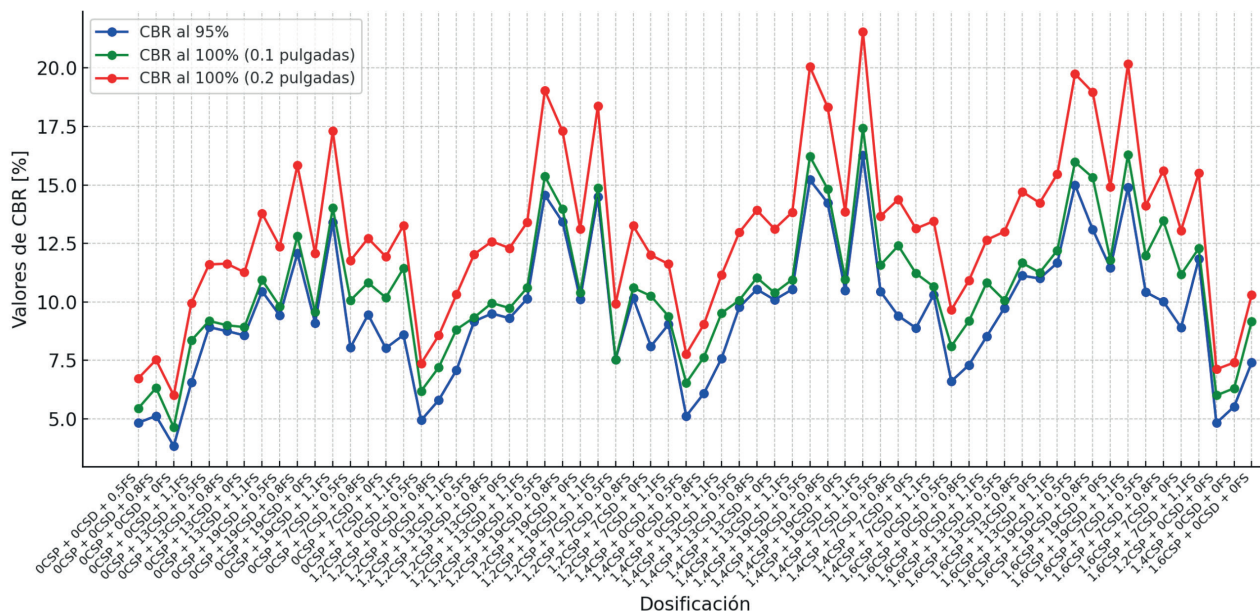


Figura 15: Variación del CBR en suelo arcilloso saturado C-02 con dosificaciones de CSP+CSD+FS

que las diferencias en los valores de CBR entre las diversas dosificaciones probadas son estadísticamente significativas. Esto respalda que las variaciones observadas no son aleatorias, sino que están directamente relacionadas con las proporciones de los aditivos utilizados.

En términos prácticos, estos hallazgos refuerzan la utilidad de los materiales evaluados como estabilizantes efectivos para suelos arcillosos. La capacidad de aumentar el CBR del suelo los posiciona como alternativas viables para mejorar las propiedades mecánicas del suelo, haciéndolo más adecuado para aplicaciones exigentes en ingeniería, como pavimentos y cimientos, donde la capacidad de soporte es un factor crítico.

Discusión de resultados

Índices de plasticidad

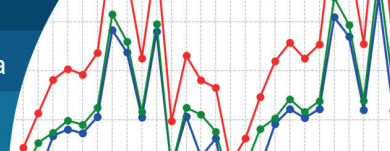
El suelo sin tratar presentó un índice de plasticidad IP inicial del 32.5%, lo que lo clasifica como un suelo de alta plasticidad (CH) según el sistema USCS. Con el propósito de analizar los efectos de cada material, se seleccionaron dosificaciones representativas de 15% para las cenizas (CSP y CSD) y 2% para las fibras de sisal. En primer lugar, al analizar el efecto de la ceniza de semilla de palta CSP, la adición del 15% provocó una disminución del IP de 32.5% a 21.3%, lo que representa una reducción absoluta de 11.2 puntos porcentuales y relativa del 34.5%. Por otro lado, con la adición del 15% de ceniza de semilla de durazno

CSD, IP se redujo a 22.8%, lo que implica una disminución absoluta de 9.7 puntos porcentuales y relativa del 29.8%. Estos valores son comparables con los reportados por Bagheri (2014) con una reducción relativa del 28% con estabilizantes de composición química similar.

Finalmente, al evaluar el efecto de las fibras de sisal FS, una dosificación del 2% permitió disminuir el índice de plasticidad de 32.5% a 25.3%, lo que equivale a una reducción absoluta de 7.2 puntos porcentuales y relativa del 22.2%. Este comportamiento coincide con lo señalado por Kamaruddin *et al.* (2019), quienes reportaron reducciones relativas de 20-25% al usar fibras naturales como estabilizantes en suelos arcillosos. En este caso, las fibras de sisal actúan mayormente como un estabilizador físico, formando una red estructural que restringe la expansión y movilidad de las partículas finas del suelo.

Capacidad de soporte CBR

El suelo arcilloso C-02 sin tratar presentó un CBR inicial del 4.3%, clasificándose como de baja capacidad de soporte. La adición de 15% de CSP aumentó este valor a 13.7%, lo que representa un incremento absoluto de 9.4 puntos porcentuales (218.6%). Este cambio clasifica al suelo como de soporte medio, apto para aplicaciones de subrasante estabilizada. Langroudi *et al.* (2021) documentaron incrementos absolutos de 9 puntos porcentuales (180%) al emplear estabilizantes con composiciones químicas



similares, mostrando una notable concordancia con los valores obtenidos en este estudio.

La adición de 15% de CSD elevó el índice CBR a 12.1%, lo que equivale a un incremento absoluto de 7.8 puntos porcentuales (181.4%). Aunque este aumento es menor que el registrado con CSP, sigue siendo significativo. Bagheri (2014) reporta incrementos absolutos de 7.5 puntos porcentuales (150%) en estudios similares, destacando la consistencia de los resultados.

Finalmente, con 2% de fibras de sisal FS, el CBR alcanzó 9.2%, marcando un incremento absoluto de 4.9 puntos porcentuales (114%). Aunque este aumento es menor, evidencia una mejora en la capacidad de soporte. Shibru (2022) reportó incrementos similares al emplear fibras naturales, reafirmando la efectividad de las FS como estabilizadores físicos en la mejora estructural del suelo.

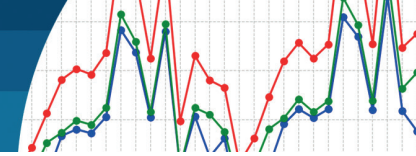
Conclusiones

La adición de combinaciones óptimas de 15% de cenizas de semilla de palta CSP, 15% de durazno CSD y 2% de fibra de sisal FS permitió reducir el índice de plasticidad IP de un suelo arcilloso de Moquegua en el sur de Perú, alcanzando valores mínimos de 15%. Este comportamiento se atribuye al contenido de CaO y SiO₂ en los aditivos, los cuales facilitan la floculación de partículas arcillosas y mejoran la cohesión interna del suelo, haciéndolo menos susceptible a la expansión y más estable frente a variaciones de humedad. El ensayo de compactación Proctor modificado evidenció un incremento en la máxima densidad seca MDS del suelo tratado, alcanzando un valor máximo de 1.83 g/cm³ con un contenido óptimo de humedad OH de 16.2%. Estos resultados muestran que la dosificación óptima de CSP, CSD y FS mejora las condiciones de compactación al incrementar la cohesión y reducir los vacíos internos del suelo. Los valores de CBR indicaron un incremento sustancial en la capacidad portante del suelo arcilloso saturado, alcanzando hasta CBR = 21.6% al 100% de la MDS Proctor con 5% de CSP y 3% de CSD. Este aumento se debe a la sinergia entre los óxidos presentes en los aditivos, que mejoran la resistencia a la compresión del suelo. El análisis ANOVA valida que las diferencias en los valores de CBR son estadísticamente significativas, destacando la aplicabilidad de estos aditivos en infraestructura vial con alta demanda de resistencia y estabilidad.

La investigación confirma que el uso de CSP, CSD y FS como aditivos estabilizantes es una alternativa técnica y ambientalmente viable para mejorar las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos blandos. Su implementación permite optimizar la estabilidad, densidad y capacidad portante del suelo, además de reducir el impacto ambiental mediante la reutilización de subproductos agroindustriales, alineándose con los objetivos de sostenibilidad en infraestructura vial.

Referencias

- Afzali, M.H. and Sharma, A. (2023). Sustainable utilization of Calcium Carbide residue along with polypropylene fiber waste materials for accessing swelling and strength characteristics of Black Cotton Soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1110, 012003
- Anburuvel, A. (2024). The engineering behind soil stabilization with additives: A state-of-the-art review. *Geotechnical and Geological Engineering* **42**(1), 1–42
- ASTM D1557 (2021). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³)). West Conshohocken, PA, USA
- ASTM D1883 (2021). Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. West Conshohocken, PA, USA
- ASTM D4318 (2017). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. West Conshohocken, PA, USA
- Bagheri, Y. (2014). *Mechanical performance evaluation of improved soils using compound stabilizer and fibre reinforcement*. Doctoral dissertation, University Sains Malaysia
- Condori, J.A. y Gutiérrez, H.J. (2024). Estudio del impacto del agregado de vidrio triturado en las características fisicomecánicas de los suelos de subrasantes. *Obras y Proyectos* **36**, 70-73
- Cotrino, E.A. (2023). *Mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de suelos arcillosos a nivel de subrasante adicionando residuos calcáreos costeros*. Trabajo de título de Ingeniero Civil Ambiental, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Perú
- Chauca, Y. K. (2024). Estudio del mejoramiento de una base granular mediante la aplicación de emulsión asfáltica CSS-1h. *Obras y Proyectos* **36**, 59-69



- Gidebo, F., Yasuhara, H. and Kinoshita, N. (2023). Stabilization of expansive soil with agricultural waste additives: a review. *International Journal of Geo-Engineering* **14**(1), 1–18
- Gong, X., Zhang, T., Zhang, J., Wang, Z., Liu, J., Cao, J. and Wang, C. (2022). Recycling and utilization of calcium carbide slag - current status and new opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **159**, 112133
- Kamaruddin, F.A., Huat, B.B., Anggraini, V. and Nahazanan, H. (2019). Modified natural fiber on soil stabilization with lime and alkaline activation treated marine clay. *GEOMATE Journal* **16**(58), 69-75
- Langroudi, S.G., Zad, A. and Rajabi, A.M. (2021). Improvement of sandy soil to prevent hydraulic failure using BCF fibers and geotextiles. *Arabian Journal of Geosciences* **14**, 1-16
- López-Niño, C., Guevara, E., León, V. y López-Hernández, D. (2023). Arcillas expansivas del Norte de Venezuela: Caracterización mediante el uso de los límites de Atterberg, índices de consistencia y ensayos de expansión. *Obras y Proyectos* **34**, 111-122
- Luo, X., Li, P., Ma, Z., Pei, Y., Ding, Z., Chen, R. and Fan, W. (2023). Investigation into the enhancement characteristics of fly ash and polypropylene fibers on calcium carbide-residue-stabilized soil. *Sustainability* **15**(23), 16360
- Rodríguez, P.C.A. (2020). Un método simplificado de predicción de hinchamiento de arcillas expansivas debido a cambios de humedad. *Obras y Proyectos* **28**, 35-44
- Sengul, C.E., Oruc, S., Iskender, E. and Aksoy, A. (2013). Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance. *Construction and Building Materials* **41**, 777–783
- Vettorelo, P.V. y Clariá, J.J. (2014). Suelos reforzados con fibras: estado del arte y aplicaciones. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* **1**(1), 27-34
- Villarroel-Ortega, J.A., Correia, A.A., Venda Oliveira, P.J. y Lemos, L. J. (2022). Influencia de parámetros claves de cargas cíclicas sobre el comportamiento de un suelo estabilizado químicamente no reforzado y reforzado con fibras. *Obras y Proyectos* **31**, 29-34