

STABILIZATION OF SANDY SOILS WITH LIME, COCONUT FIBERS AND DISUSED BRICKS FOR SUBGRADES

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARENOSOS CON CAL, FIBRAS DE COCO Y LADRILLOS EN DESUSO PARA SUBRASANTES

Diana Judith, Villar Paucar¹; Luis Villar, Requis Carbajal²; Yalin, Manchay Rivera³

Recibido: 16/12/2025; Evaluado: 25/03/2026; Aprobado: 16/04/2026

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica272.1>

ABSTRACT

This research promotes industrial innovation and the development of sustainable infrastructure with an emphasis on environmental protection. Its main goal was to improve the stability of sandy soils used for subgrades through the combined use of lime, coconut fibers, and recycled bricks. An applied methodology with a quantitative approach was employed, based on a quasi-experimental design and a hypothetical-deductive scientific method at an explanatory level. The sample consisted of sandy soils from three test pits, 1.5 m deep, located on Av. Los Jazmines – Pachacámac, distributed between km 0,191+ and km 0,394+. The soils were classified into a control group and four experimental groups following a 23-1 fractional factorial design. The results demonstrated that the incorporation of the stabilizing materials significantly improves the mechanical properties of the soil, contributing to the implementation of more durable and environmentally friendly infrastructure.

Keywords: *stabilization of sandy soils; mechanical properties of soil; subgrade*

RESUMEN

Esta investigación impulsa la innovación industrial y el desarrollo de infraestructuras sostenibles con énfasis en la protección ambiental, la cual tuvo como meta principal mejorar la estabilidad de suelos arenosos para subrasantes mediante el uso combinado de cal, fibras de coco y ladrillos reciclados. Se empleó una metodología aplicada con enfoque cuantitativo, basada en un diseño cuasiexperimental y un método científico hipotético-deductivo de nivel explicativo. La muestra consistió en suelos arenosos de tres calicatas de 1,5 m de profundidad, ubicadas en la Av. Los Jazmines – Pachacámac, distribuidas entre km 0,191+ y km 0,394+. Los suelos se clasificaron en un grupo control y cuatro grupos experimentales siguiendo un diseño factorial fraccionado 23-1. Los resultados demostraron que la incorporación de los materiales estabilizantes mejora notablemente las propiedades mecánicas del suelo, contribuyendo a la implementación de infraestructuras más duraderas y respetuosas con el medio ambiente.

Palabras clave: *estabilización de suelos arenosos; propiedades mecánicas del suelo; subrasante*

¹Diana Judith, Villar Paucar. Ingeniero civil. Universidad César Vallejo (ROR:0297axj39). Lima, Perú. Correo: dvillarpa@ucvvirtual.edu.pe. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3923-6494>

²Luis Villar, Requis Carbajal. Doctor en Ingeniería Civil. Universidad César Vallejo (ROR:0297axj39). Lima, Perú. Correo: lrequis@ucv.edu.pe. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3816-7047>

³Yalin, Manchay Rivera. Ingeniero civil. Universidad César Vallejo (ROR:0297axj39). Lima, Perú. Correo: mmanchayri@ucvvirtual.edu.pe. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5922-8067>

1. INTRODUCCIÓN

En el Perú, las vías no pavimentadas muestran un deterioro avanzado principalmente por la baja calidad del suelo en las subrasantes, lo que afecta la estabilidad y durabilidad de los pavimentos. A nivel global, los suelos arenosos presentan características de baja cohesión y alta compresibilidad que generan riesgos de inestabilidad, especialmente en terrenos inclinados [1]. En el contexto peruano, la estabilización de suelos arenosos mediante aditivos como cal y fibras naturales, acompañada de técnicas de compactación y mezcla con materiales complementarios, ha demostrado mejorar las propiedades mecánicas y la capacidad portante de las subrasantes viales [2]. Además, los sistemas de drenaje y cobertura vegetal contribuyen a la protección contra la erosión y conservación de la humedad, aspectos críticos en zonas con actividad sísmica frecuente como Lima.

Este estudio evalúa una alternativa sostenible para la estabilización de suelos en subrasantes a través de la combinación de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso, alineándose con principios de economía circular e infraestructura resiliente conforme al Objetivo 9 de Desarrollo Sostenible [3]. Planteándose como pregunta principal: ¿Cómo el uso combinado de estos materiales mejora la estabilización de suelos arenosos para subrasantes en Pachacámac? Para ello, se investigan sus efectos en parámetros clave como límites de Atterberg, Proctor modificado y capacidad portante.

2. DESARROLLO

2.1. Antecedente

La estabilización de suelos arenosos mediante materiales alternativos ha sido objeto de diversos estudios internacionales y nacionales, que han aportado conocimiento valioso para optimizar las propiedades mecánicas y la durabilidad de subrasantes viales. Por ejemplo, se ha estudiado la incorporación de cenizas volantes y tiras plásticas de Tereftalato de Polietileno (PET) en suelos arenosos de la región del Golfo, donde encontraron que el 15% de cenizas volantes incrementó

significativamente la densidad seca y el CBR, mejorando la capacidad portante del suelo. En contraste, la adición de 0.5% de tiras plásticas aumentó la densidad seca, pero no modificó sustancialmente el CBR [4]. Por otro lado, se evaluó el efecto combinado de cal y metacaolín en suelos arenosos, observando mejoras en la resistencia al corte y parámetros clave, con un efecto particularmente favorable cuando se reemplazó parcialmente por la mencionada mezcla [5].

En otros estudios, se demostró que la fibra de polipropileno incrementa el ángulo de fricción interna, la resistencia al corte y el Californian Bearing Ratio (CBR), con una notable reducción en la permeabilidad del suelo tratado. Otros aportes significativos incluyen investigaciones sobre fibras naturales, residuos de ladrillo y otros materiales reciclados, que evidencian la viabilidad de estas estrategias para la mejora estructural y ambiental del suelo arenoso [6].

En el contexto nacional, se analizó la estabilización con cenizas de carbón, mostrando mejoras en la capacidad portante, aunque sin alcanzar los estándares para subrasantes mejoradas [7]. Igualmente, se evidenció la eficacia de materiales como fibras de yute, yeso reciclado, cal y fibras de caucho en la mejora mecánica de diversos tipos de suelo [8,9]. A ello se suman estudios recientes sobre el empleo de geomallas, polímeros reciclados, polvo de caucho y PET reciclado, que consolidan la tendencia hacia el uso de materiales sostenibles y accesibles para el mejoramiento de infraestructuras viales en diversas regiones del país.

Estos antecedentes fundamentan la presente investigación, que tiene como objetivo evaluar el efecto conjunto de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso en la estabilización de suelos arenosos para subrasantes en Pachacámac, Lima, buscando contribuir a la construcción de vías más duraderas, seguras y ambientalmente responsables.

2.2. Contenido Teórico

La formación de arenas es un proceso natural complejo que involucra la erosión y desintegración de rocas y materiales

superficiales influenciada por agentes como el viento, agua, hielo y actividad biológica. Estas partículas, sometidas a transporte por viento y agua, sufren procesos adicionales de erosión antes de depositarse en formas como playas o dunas, pudiendo eventualmente compactarse y formar rocas sedimentarias denominadas areniscas. La clasificación de partículas en ambientes fluviales, como los meandros de ríos, obedece a procesos geomorfológicos e hidrodinámicos. La dinámica fluvial diferencia zonas de erosión y deposición según la velocidad del agua, donde la vegetación ribereña estabiliza sedimentos contribuyendo a la formación y evolución del suelo.

Además, los ciclos de inundación redistribuyen estos sedimentos, afectando la morfología y composición del suelo. Por otro lado, la formación de suelos por la acción del aire se basa en procesos de meteorización física y química que afectan el sustrato rocoso expuesto a la atmósfera. La erosión eólica y la deposición de partículas finas forman suelos eólicos, como los depósitos de loess, que enriquecen y modifican las características del suelo en áreas expuestas. Desde la perspectiva de la estabilización de suelos, los objetivos son asegurar la solidez y durabilidad de estructuras mediante técnicas como la compactación para aumentar la densidad y resistencia, la adición de estabilizantes químicos cal, cemento y el uso de geosintéticos que proporcionan refuerzo y separación de capas para mejorar la estabilidad.

En cuanto a métodos, se distingue la estabilización física que utiliza aditivos materiales para modificar características del suelo, y la estabilización química que altera sus propiedades por medio de agentes como la cal, con mejoras en capacidad de carga y resistencia, comúnmente aplicadas en carreteras y cimentaciones. La estabilización mecánica implica la manipulación física del suelo para mejorar la cohesión y capacidad de carga, usando técnicas como compactación con rodillos y geotextiles.

El suelo es un recurso esencial y vulnerable, con características variadas según el clima, la geología y la actividad humana. La conservación y manejo adecuado del suelo son

fundamentales para la sostenibilidad ambiental, salud humana y desarrollo económico [10]. Finalmente, los suelos arenosos, predominantes en la investigación, se caracterizan por baja cohesión y alta permeabilidad, con estructura porosa que favorece el drenaje rápido. Parámetros como el análisis granulométrico, peso específico, límites líquido y plástico, y el índice de plasticidad son fundamentales para comprender su comportamiento y optimizar su estabilización [11, 12, 13].

En cuanto a los materiales estabilizantes, la cal reduce la plasticidad y aumenta la resistencia del suelo mediante reacciones químicas que mejoran la cohesión, siendo ideal para suelos expansivos. Las fibras naturales y sintéticas refuerzan la matriz, previniendo fisuración y aportando durabilidad. La reutilización de ladrillos en desuso, triturados e incorporados al suelo, mejora la capacidad portante y el drenaje, constituyendo además una solución sostenible para la gestión de residuos.

3. METODOLOGÍA

La presente investigación se diseñó bajo un enfoque aplicado y cuantitativo, con un nivel explicativo enfocado en analizar en profundidad el fenómeno de la estabilización de suelos arenosos mediante la incorporación de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso. Se empleó un diseño cuasiexperimental, apropiado para estudios donde la manipulación directa y controlada de la variable independiente es posible, pero la asignación aleatoria a grupos no se realiza por condiciones prácticas o logísticas. Este diseño permitió evaluar el efecto de tres factores manipulados en distintas proporciones sobre la estabilización del suelo, medida en términos físico-mecánicos.

La población de estudio fueron los suelos arenosos del tramo vial comprendido en la Av. Los Jazmines, Asociación El Mirador del Inca en Pachacámac. La muestra se obtuvo mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, enfocándose en suelos caracterizados por baja cohesión y capacidad portante limitada, con exclusión de suelos contaminados o con características distintas

como arcillas predominantes. El diseño experimental aplicado fue factorial fraccionado 23-1, que permite evaluar la interacción de tres variables independientes: cal en contenido de 2% y 5%, fibras de coco en 0,5% y 1,5%, y ladrillos en desuso en proporciones de 5% y 10%.

Estas combinaciones facilitaron el análisis del impacto de cada factor y sus interacciones con un menor número de ensayos experimentales, optimizando recursos y tiempo. Las variables dependientes evaluadas fueron los parámetros que determinan la estabilidad del suelo: límites de Atterberg (límites líquido y plástico), densidad máxima seca y contenido óptimo de humedad mediante el ensayo Proctor modificado (ASTM D1557) [14], y capacidad de soporte utilizando la prueba de CBR bajo condiciones normalizadas según las

normativas vigentes (ASTM D1883) [15].

Los datos para estas variables se obtuvieron mediante ensayos estandarizados y validados, cuyos resultados fueron registrados en fichas de laboratorio certificadas. La validez de los instrumentos fue avalada por expertos mediante evaluación cualitativa y cuantitativa, asegurando un coeficiente de confiabilidad mínimo del 70%. Para el análisis estadístico se utilizaron herramientas computacionales avanzadas Minitab, que permite aplicar análisis descriptivos, pruebas de normalidad y contrastes de hipótesis. Estas técnicas aseguraron la identificación de relaciones significativas entre los factores estudiados y la respuesta del suelo, reforzando la validez interna y externa del estudio. En la Figura 1 se esboza el procedimiento metodológico realizado.

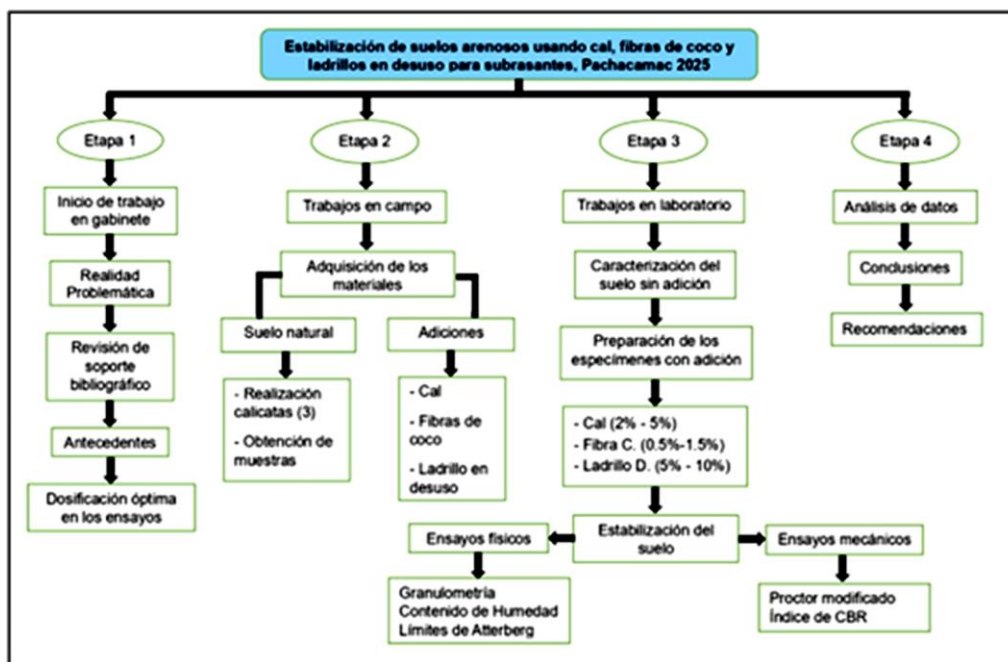


Figura 1. Esquema del proceso metodológico experimental. Fuente: los autores

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características Físicas y Mecánicas del Suelo Natural

El suelo natural (GP) de la calicata C-2, seleccionado para la estabilización, fue clasificado según AASHTO como A-2-6 (0)

(Grava y Arena Limosa), categorizado como un material granular de calidad Excelente a Buena como subrasante. Asimismo, en la Tabla 1, se muestra las propiedades mecánicas obtenidas de suelo natural, como son, Contenido Óptimo de Humedad (OCH) y Máxima Densidad Seca (MDS).

Tabla 1. Resultados de los ensayos mecánicos al suelo natural. Fuente: los autores

ENSAYO	TIPO	
Límites de Atterberg	Límite Líquido (L.L.) de 22,6%	Límite Plástico (L.P.) de 11,24%.
Proctor Modificado Índice de CBR a 2"	Contenido Óptimo de Humedad (OCH) de 10,84% 18,74% al 95% de la MDS	Máxima Densidad Seca (MDS) de 2,01 g/cm ³ 2,10% al 100% de la MDS

4.2. Características Físicas y Mecánicas del Suelo Tratado

Ensayo de límites de Atterberg de suelo tratado. Todos los grupos experimentales (G. EXP1, G. EXP2, G. EXP3 y G. EXP4) mostraron una mejora en su clasificación respecto al suelo patrón, pasando de A-2-6 (0) a A-2-4 (0), lo que implica una reducción en los finos plásticos y una mayor estabilidad. En de la Figura 2 se muestra los límites de Atterberg que definen la plasticidad y

consistencia del suelo. Los grupos experimentales reflejaron cambios significativos en la plasticidad. El Grupo EXP3 presentó el mayor incremento en límite líquido (30,3%), y el Grupo EXP4 registró el mayor límite plástico (20,42%), comparados con el grupo patrón (22,60% y 11,24% respectivamente). Estos valores reflejan cambios en la composición del suelo que afectan su comportamiento ante la humedad y las cargas.

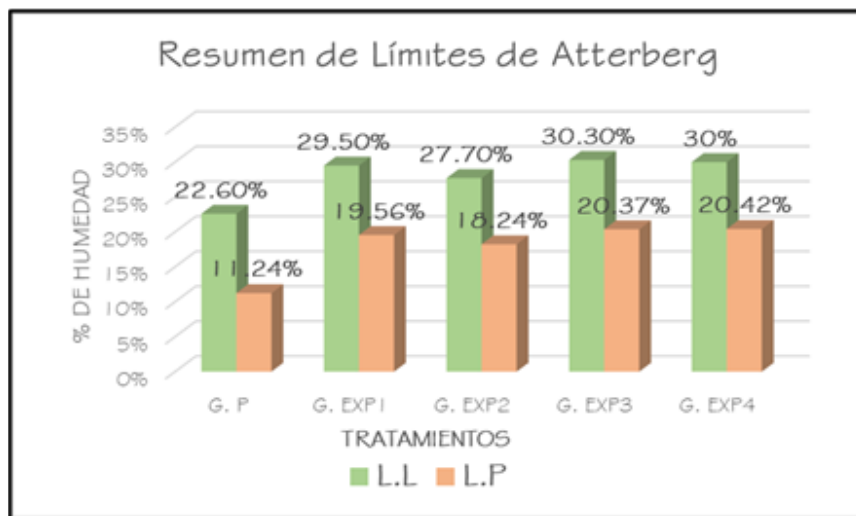


Figura 2. Resumen de Límites de Atterberg. Fuente: los autores

Ensayo de Proctor Modificado de suelo tratado. En la figura 3 se muestran que el Grupo EXP2 (5% cal, 0,5% F. Coco, 5% Ladrillo D.) mostró la mayor MDS con 2,15 g/cm³, superando al patrón (2,01 g/cm³). El aumento de la MDS implica una mayor capacidad portante y estabilidad mecánica del

suelo. Por su parte, el Grupo EXP3 presentó la mayor variación en el OCH con 12,25%. El ajuste en el OCH refleja una mejor adaptación del suelo para alcanzar la densidad máxima con un contenido de humedad más favorable, facilitando la compactación eficiente en obra.

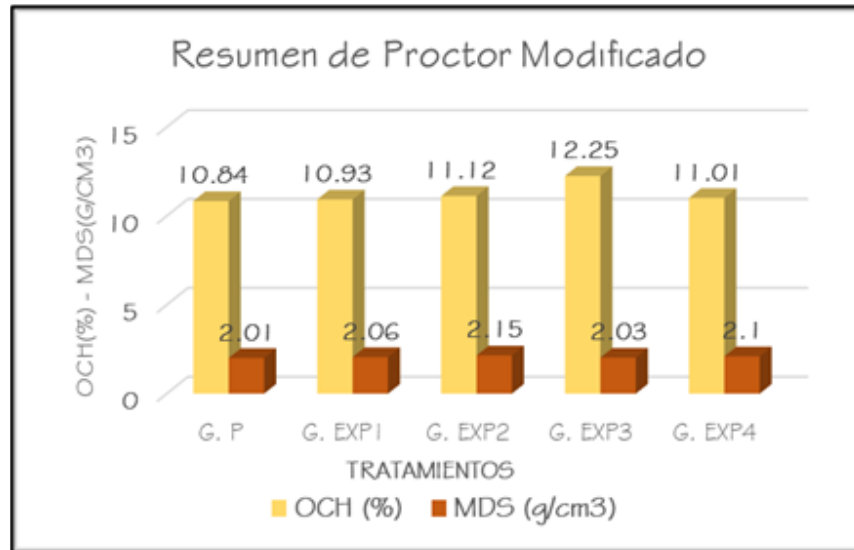


Figura 3. Resumen de Proctor Modificado. Fuente: los autores

Ensayo de índice CBR de suelo tratado. La Figura 4 ilustra que el Grupo EXP2 evidenció el mayor incremento en el CBR, alcanzando 33,73% al 95% de la MDS y 41,53% al 100% de la MDS. Estos valores son significativamente más elevados que los del

suelo natural (18,74% y 22,1%). Este aumento dramático en el CBR señala que la estabilización incrementó la capacidad de soporte del suelo, haciéndolo apto para su uso en estructuras viales.

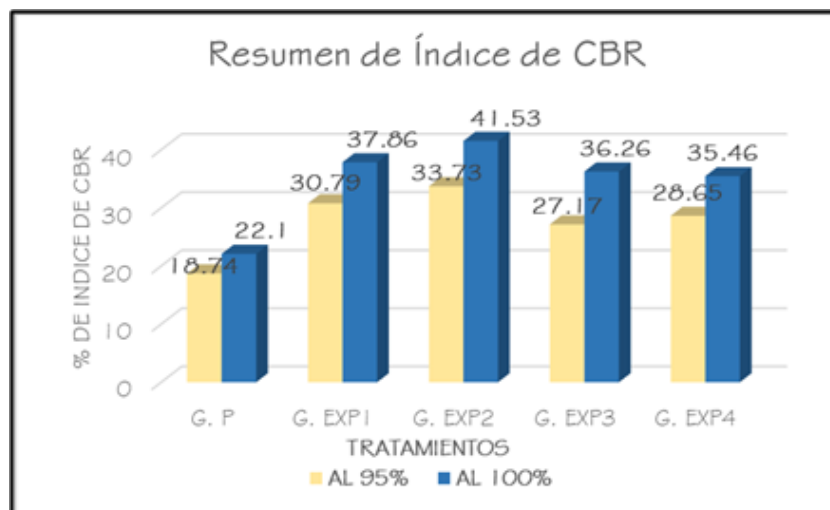


Figura 4. Resumen de Índice de CBR. Fuente: los autores

4.2. Análisis Estadístico

El análisis estadístico se basó en el Análisis de Varianza (ANOVA) factorial para tres variables independientes (cal, fibras de coco y ladrillos en desuso) y sus niveles de dosificación, verificando previamente los supuestos de normalidad y homocedasticidad para asegurar la validez de las inferencias.

Contrastación de hipótesis (H1).

H0: “Utilizando cantidades preestablecidas de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso no altera los límites de Atterberg en la estabilización de suelos arenosos para subrasantes”.

H1: “Utilizando cantidades preestablecidas de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso altera

los límites de Atterberg en la estabilización de suelos arenosos para subrasantes”

Tabla 2. Resumen del contraste de la hipótesis H1. Fuente: los autores

Propiedad	Factor más Influyente	Contribución Clave	Decisión
Límite Líquido (L.L.)	Fibra de coco (Factor B)	Efecto altamente significativo (P=0.000); principal modificador	Se acepta H1
Límite Plástico (L.P.)	Fibra de coco (Factor B)	Efecto altamente significativo (P=0,005). La cal no fue estadísticamente significativa	Se acepta H1

Se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alternativa (H1), confirmando que los aditivos alteran significativamente los límites de Atterberg y, por ende, la plasticidad del suelo arenoso.

Contrastación de hipótesis (H2).

H0: “Adicionando cantidades predeterminadas de cal, fibras de coco y

ladrillos en desuso no varía el Proctor modificado en la estabilización de suelos arenosos para subrasantes”.

H2: “Adicionando cantidades predeterminadas de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso varía el Proctor modificado en la estabilización de suelos arenosos para subrasantes”

Tabla 3. Resumen del contraste de la hipótesis H2. Fuente: los autores

Propiedad	Factor más Influyente	Contribución Clave	Decisión
OCH	Ladrillos en desuso (Factor C)	Mayor impacto (46,37% de contribución); estadísticamente significativo (P=0,017)	Se acepta H2
MDS	Cal (Factor D)	Factor más relevante (79,33% de contribución); estadísticamente significativo (P=0,010)	Se acepta H2

Se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alternativa (H2), verificando que la adición de los materiales varía significativamente tanto la MDS como el OCH, siendo la cal determinante para la densidad.

Contrastación de hipótesis (H3).

H0: “Incorporando cantidades precalculadas

de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso no modifica el CBR en la estabilización de suelos arenosos para subrasantes”.

H3: “Incorporando cantidades precalculadas de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso modifica el CBR en la estabilización de suelos arenosos para subrasantes”

Tabla 4. Resumen del contraste de la hipótesis H3. Fuente: los autores

Propiedad	Factor más Influyente	Contribución Clave	Decisión
CBR al 95% MDS	Fibra de coco (Factor B)	Mayor influencia (77,59% de la variabilidad); altamente significativo H1. (P=0,000)	Se acepta H3
CBR al 100% MDS	Fibra de coco (Factor B)	Mayor influencia (65,31% de la variabilidad); altamente significativo H1. (P=0,000)	Se acepta H3

Aunque la prueba de normalidad para el CBR al 100% resultó marginal o rechazada (P=0,020), la prueba de homogeneidad de varianzas fue satisfactoria (P=0,978), y el modelo ANOVA explicó casi toda la variabilidad (99,77%). En conclusión, Se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alternativa (H3), concluyendo que la incorporación de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso modifica significativa y positivamente la Relación de Soporte de California (CBR) del suelo arenoso.

4.3. Discusión de Resultados

Los resultados de esta investigación sobre la estabilización de suelos arenosos con cal, fibras de coco y ladrillos en desuso confirman una mejora significativa en las propiedades mecánicas y la durabilidad del suelo. Respecto a la alteración de los límites de Atterberg (OE1), aunque se investigaron suelos arenosos, la tendencia de la estabilización química con cal y materiales orgánicos (como la fibra de coco) a optimizar las propiedades de consistencia es consistente con estudios previos. Por ejemplo, encontró que la estabilización en suelos arcillosos con cal y ceniza de cáscara de cebada mejoró la consistencia y estabilidad volumétrica, al igual que las modificaciones positivas observadas aquí en el límite líquido y plástico [16].

En cuanto a la variación del Proctor Modificado (OE2), el aumento de la MDS en el G. EXP2 a 2,15 g/cm³ refleja una mayor capacidad portante y estabilidad mecánica.

Este hallazgo concuerda con Islam et al. [16], quienes demostraron la efectividad de los refuerzos fibrosos naturales (fibra de yute) combinados con otros aditivos para optimizar MDS y OCH en suelos arenosos. La combinación de cal, fibras de coco y ladrillos en desuso en este estudio reafirma la viabilidad de optimizar estos parámetros clave en suelos arenosos para subrasantes viales.

Finalmente, la modificación significativa del CBR (OE3) se alinea con investigaciones que emplean agregados de residuos donde se triplicó el CBR de arenas eólicas usando agregados de residuos de ladrillos cerámicos. El G. EXP2, que logró un CBR de 33,73% (95% MDS), demuestra que la inclusión de residuos de ladrillo en desuso junto con cal y fibras naturales ofrece beneficios complementarios de cohesión y estabilidad volumétrica, esenciales para subrasantes viales [17]. La mejora es sustancial, incluso comparada con el uso de tecnologías avanzadas como los geopolímeros basados en metacaolín, donde si bien estos últimos optimizan la microestructura, la combinación empleada en esta investigación fortalece propiedades macroscópicas críticas como la densidad seca y la cohesión volumétrica [18].

5. CONCLUSIONES

El análisis estadístico y los resultados de laboratorio confirman que las cantidades preestablecidas de aditivos alteran los límites de Atterberg significativamente. El G. EXP3 (2% cal, 1,5% fibras, 5% ladrillo) mostró el

mayor Límite Líquido (30,3%), y el G. EXP4 (5% cal, 1,5% fibras, 10% ladrillo) el mayor Límite Plástico (20,42%), ambos indicando una mejor adaptación y desempeño de la subrasante ante variaciones de humedad. La adición de los materiales varía el Proctor modificado significativamente. El G. EXP2 (5% cal, 0,5% fibras de coco, 5% ladrillo) obtuvo la Máxima Densidad Seca (MDS) más alta (2,15 g/cm³), lo que implica una mayor capacidad portante y estabilidad mecánica el suelo. La incorporación de los aditivos modifica el CBR significativamente. El G. EXP2 evidenció el mayor incremento en el CBR (33,73% al 95% MDS y 41,53% al 100% MDS), demostrando un aumento sustancial en la capacidad portante y resistencia mecánica del suelo para su uso en pavimentos.

En conjunto, estos resultados validan que las proporciones específicas de cal, fibras y ladrillo en desuso actúan de forma sinérgica, mejorando las propiedades físicas y mecánicas del suelo, permitiendo una mejor adaptación a las condiciones variables en obra y asegurando un desempeño óptimo y duradero. Esta propuesta representa una alternativa técnica viable y ambientalmente sostenible para la estabilización de suelos arenosos en proyectos de ingeniería civil.

6. RECOMENDACIONES

Se aconseja continuar la investigación y promoción del uso de materiales reciclados y naturales, como cal, fibras de coco y ladrillos en desuso, para la estabilización de suelos arenosos en subrasantes, debido a su impacto positivo en propiedades mecánicas y durabilidad. Es necesario ampliar estudios en distintas condiciones geográficas y escalas mayores para validar su efectividad. Se recomienda profundizar en el análisis de la interacción entre los niveles de los materiales mediante diseños factoriales completos para optimizar la resistencia y estabilidad del suelo.

Además, se sugiere incorporar pruebas complementarias que evalúen el comportamiento integral bajo cargas reales y realice ensayos de durabilidad frente a condiciones adversas para validar la estabilidad a largo plazo. Un análisis costo-

beneficio es vital para evaluar la viabilidad económica considerando la disponibilidad local, favoreciendo soluciones sostenibles. Finalmente, se promueve la integración de estas alternativas en normativas y prácticas constructivas, alineadas con el desarrollo sostenible y la innovación en ingeniería civil.

7. FINANCIAMIENTO

La investigación que ha dado origen a este artículo no ha recibido el aporte financiero de ninguna fuente.

8. CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores hacen constar que no poseen ningún tipo de conflicto de interés que pueda influir en la objetividad y transparencia del presente estudio.

9. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

DJVP: Redacción, revisión, edición, conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, recursos, validación. LVRC: Conceptualización, metodología, revisión, redacción, edición. YMR: Redacción, revisión, conceptualización, análisis estadístico, investigación, metodología, recursos, validación.

10. REFERENCIAS

- [1] N. Shariatmadari et al., "Experimental study on the effect of chitosan biopolymer on sandy soil stabilization" *E3S Web of Conferences*, vol. 195, Disponible en: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/16/e3sconf_iccsre2020_03004/e3sconf_iccsre2020_03004.html, 2020
- [2] C. E. Goicochea Vigo y M. Lugones Loaiza, "Uso de sedimentos de Chavimochic y Cal para la estabilización de suelos arenosos en el tramo desvió de Virú – puerto Morín – la libertad 2022" Tesis, Universidad Privada Antenor Orrego, Disponible en: <https://repositorio.upao.edu.pe/item/ff478697-0da3-4f96-8d0f-a323577d386a>, 2023
- [3] PNUD, "¿Qué son los Objetivos de Desarrollo Sostenible?" Disponible en:

- <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>, 2016
- [4] A. Aliya et al., “Enhancement of the existing soil strength using waste materials as a stabilization resource for sustainable development,” *Materials Today: Proceedings*, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.1912023>, 2024
- [5] G. Alhakim, O. Baalbaki y L. Jaber, “Compaction and shear behaviors of sandy soil treated with lime and metakaolin,” *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 42, no.1, Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02645-2>, 2024
- [6] N. Al-Saray et al., “Improvement of strength characteristics for sandy soils by polypropylene fibers (PPF),” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1895, no. 1, Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012013>, 2021
- [7] O. Goñas y J. Saldaña, “Estabilización de suelos con cenizas de carbón,” *Rev. Cient. UNTRM*, vol. 3, no. 1, Disponible en: <https://doi.org/10.25127/ucni.v3i1.589>, 2020
- [8] H. Z. Checalla Paredes y M. D. Villegas Morales, “Estabilización de suelos arcillosos con adición de cal para el mejoramiento de la sub rasante, carretera los Ángeles-Yacango-Moquegua-2022”, Trabajo de Grado, Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_167232e367b5c5d42ac59c404e620797, 2022
- [9] J. Talledo y J. Sánchez, “Mejoramiento de suelos arcillosos mediante fibras de caucho reciclado”, Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12893/11569>, 2023
- [10] R. Oyola, “Determination of the resistance to penetration of cohesive soil,” *Revista Arquitectura e Ingeniería*, ISSN-e 1990-8830, Vol. 10, (3), 2016
- [11] M. C. Nanzer, “Total organic carbon stock and granulometric fractioning of organic matter in soil use systems in Cerrado”, *Rev. Ciênc. Agrovet.*, vol. 18, no. 1, pp. 136–145, 2019
- [12] J. Gonzales y O. Chaves, “Expansion evaluation of presaturated soils,” *Ingeniería, investigación y tecnología*, ISSN 1405-7743, ISSN-e 2594-0732, Vol. 22, N°. 4, 2021
- [13] A. C. Aguiar and D. L. Q. Camargo, “Soil characterization: laboratory tests (granulometry, Atterberg limits), Proctor and CBR”, *Engineering Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 1–8, 2023.
- [14] ASTM, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))”, ASTM D1557-12, Disponible en: <https://store.astm.org/d1557-12r21.html>, 2021
- [15] ASTM, “Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils”, ASTM D1883-21, Disponible en: <https://store.astm.org/d1883-21.html>, 2021
- [16] R. Quispe, “Estabilización de suelos arcillosos con cal y cenizas”, Trabajo de Grado, Universidad Nacional del Centro del Perú, Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/10315>, 2023.
- [17] N. Islam et al., “Sandy soil stabilization using jute fiber,” *Journal of Geotechnical Studies*, vol. 6, no. 2, pp.30–34, 2021
- [18] J. Arias et al., “Mechanical stabilization of aeolian sand with ceramic brick waste aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 363, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129846>, 2023
- [19] R. Mohammed et al., “Characterizing geotechnical properties of sand subgrade soils stabilized with geopolymer,” *Case*

Studies in Construction Materials, 2025

11. LICENCIA Y DERECHO DE AUTOR

Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Los autores conservan los derechos de autor de los artículos publicados y otorgan al editor el derecho a publicarlos, a ser citados como su editor original en caso de reutilización y a distribuirlos en todos los formatos y medios.

12. LICENSE & COPYRIGHT

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-NC-SA 4.0)

Authors retain copyright of the published papers and grant to the publisher the right to publish the article, to be cited as its original publisher in case of reuse, and to distribute it in all forms and media.