

INCORPORACIÓN DE CENIZA DE CÁSCARA DE HUEVO EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARCILLOSA EN APURÍMAC, PERÚ

INCORPORATION OF EGG SHELL ASH IN THE STABILIZATION OF CLAYEY SUBGRADE IN APURIMAC, PERU

Rudy, Aquis Ramos¹; Javier, Reynoso Oscanoa²

Recibido 28/02/2025; Aprobado: 15/05/2025

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica262.6>

RESUMEN

La estabilización de suelos arcillosos es un desafío persistente en la ingeniería civil, particularmente en regiones con proyectos de infraestructura en áreas de suelos expansivos. Este estudio evalúa la efectividad de incorporar ceniza de cáscara de huevo (CCH) para mejorar las propiedades mecánicas de subrasantes arcillosas en la Av. Alisos, Anccohayllo, Apurímac, Perú. La investigación incluyó muestreo de campo y pruebas de laboratorio para analizar la relación de soporte de California (CBR), las características de compactación y la plasticidad de muestras de suelo con porcentajes variables de CCE de 10%, 15% y 20%. Los resultados mostraron una mejora significativa en los valores de CBR, con un aumento del 71,79% usando 20% de CCE, lo que indica un aumento sustancial en la capacidad de carga del suelo. Además, la Densidad Seca Máxima (DSM) aumentó y el Contenido Óptimo de Humedad (COH) disminuyó, lo que sugiere una mejor compactación y estabilidad del suelo. Aunque el efecto sobre la plasticidad no fue estadísticamente significativo, se observó una ligera reducción. Este estudio concluye que la CCE es un aditivo viable y sostenible para estabilizar subrasantes arcillosas, ofreciendo una alternativa respetuosa con el medio ambiente mediante la reutilización de residuos agrícolas.

Palabras clave: *materiales reutilizables; cenizas de cáscara de huevo; subrasante; estabilización de suelos; construcciones sustentables*

ABSTRACT

The stabilization of clayey soils is a persistent challenge in civil engineering, particularly in regions with infrastructure projects in expansive soil areas. This study evaluates the effectiveness of incorporating eggshell ash (CCH) to improve the mechanical properties of clayey subgrades on Av. Alisos, Anccohayllo, Apurímac, Peru. The research included field sampling and laboratory tests to analyze the California Bearing Ratio (CBR), compaction characteristics, and plasticity of soil samples with varying CCH percentages of 10%, 15%, and 20%. Results showed significant improvement in CBR values, with a 71,79% increase using 20% CCH, indicating a substantial increase in soil bearing capacity. Additionally, the Maximum Dry Density (MDD) increased and the Optimum Moisture Content (OMC) decreased, suggesting better soil compaction and stability. Although the effect on plasticity was not statistically significant, a slight reduction was observed. This study concludes that CCH is a viable and sustainable additive for stabilizing clayey subgrades, offering an environmentally friendly alternative through the reuse of agricultural waste.

Keywords: *reusable materials; eggshell ash; subgrade; soil stabilization; sustainable construction*

¹Rudy, Aquis Ramos. Ingeniero Civil. Universidad César Vallejo. Perú. Correo: aaquisera@ucvvirtual.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3410-5199>

²Javier, Reynoso Oscanoa. Ingeniero civil. Docente investigador de la Universidad César Vallejo. Perú. Correo: jreynosoos@ucvvirtual.edu.pe. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1002-0457>

1. INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos representa un gran desafío para la ingeniería civil, sobre todo en aquellas estructuras compuestas por materiales arcillosos como los identificados en la subrasante de las carreteras. Esta problemática se debe a características internas como la baja resistencia derivando en fallas estructurales de pavimentos, incrementando la necesidad de mantenimiento y costos de construcción [1]. En respuesta a estos problemas se consideró investigar el uso de materiales residuales ofreciendo soluciones técnicas, viables y que generen un impacto ambiental positivo.

En Perú, el proceso de estabilizar los suelos en regiones como Apurímac en donde las condiciones climatológicas y geográficas son complejas representan un reto significativo para el desarrollo de estructuras resistentes y duraderas. Específicamente en la Av. Ancohayllo en la cual los suelos arcillosos expansivos son comunes, la prioridad de implementar estas técnicas que aumenten las características de carga y sean sostenibles ambiental y económicamente son cruciales [1].

El uso de cenizas de cáscaras de huevo (CCH) en suelos manifiesta buenos resultados a nivel global, además, presenta ventajas ambientales y económicas, al ser un subproducto agrícola, la reutilización del mismo ayuda a reducir la cantidad de residuos sólidos, gestionados de manera adecuada, disminuyendo la huella ambiental a nivel infraestructura [2]. Por tanto, el presente estudio va dirigido a evaluar la efectividad de incorporar CCH para mejorar las propiedades mecánicas de subrasantes arcillosas en la Av. Alisos, Ancohayllo, Apurímac, Perú.

2. ANTECEDENTES

A nivel internacional se encuentran disponibles estudios relativos a esta materia sobre todo en países asiáticos, por ejemplo, en Malasia e India el uso de este material mejora significativamente los suelos, ofreciéndoles mayor resistencia y plasticidad. Un claro ejemplo de ello es la mezcla que se da entre ceniza con cal o polvo de cantera los cuales

produjeron suelos 30% más resistentes, mejorando las aceras, brindándole mayor durabilidad y funcionalidad [3, 4]. Además de estos beneficios técnicos, el uso de cenizas de cáscara de huevo presenta ventajas ambientales y económicas, al ser un subproducto agrícola, la reutilización del mismo ayuda a reducir la cantidad de residuos sólidos, gestionados de manera adecuada, disminuyendo la huella ambiental a nivel infraestructura [5]; demostraron que la integración de este material en proyectos de estabilización de suelos tiene gran adaptación en diversas regiones en las cuales el residuo agrícola y la disponibilidad de cáscaras de huevo es común

Recientes investigaciones en Irán y Pakistán han demostrado que el uso de CCH mejora los niveles de compactación bajo condiciones climáticas y geográficas variables [6]. Indican que la adición del 10% de este material en suelos arcillosos aumentan la densidad máxima debido a la reducción del contenido óptimo de humedad dando como resultado una mejor compactación y estabilidad a la capa subrasante.

La aplicación de CCH como estabilizador de suelos arcillosos es una técnica que promete responder a determinados desafíos técnicos, ofreciendo soluciones sostenibles a problemas ambientales [7]. A nivel global la evidencia científica brinda respaldo respecto a su eficacia en la mejora de la resistencia, la reducción de la plasticidad y la densidad del suelo compactado.

Adicionar este material en suelos arcillosos ha comenzado a ganar reconocimiento en Perú, especialmente en el contexto de encontrar soluciones que reduzcan los costos y mantengan la capacidad de las estructuras para perdurar en el tiempo. Estudios recientes han mostrado que este residuo calcinado mejora de manera notable, las características de los suelos arcillosos., como la resistencia y la reducción de la plasticidad. Este enfoque no solo es efectivo, además, aporta a la gestión de desechos. agrícolas, un tema particularmente relevante en regiones rurales con alta producción de huevos [8].

En Apurímac, donde los suelos arcillosos presentan problemas de expansión y contracción que pueden comprometer la estabilidad de los pavimentos, la estabilización con este material orgánico presenta como un mecanismo innovador. Investigaciones en regiones con condiciones geológicas similares han demostrado que el añadido de un 10% en la composición del suelo, puede aumentar su resistencia a cargas un 20-30%, lo cual es crucial para soportar el tráfico vehicular y prevenir fallas prematuras en las vías [9].

Además, el uso de CCH está alineada a los objetivos de sostenibilidad en la construcción, promoviendo el reciclaje de residuos y reduciendo la dependencia de materiales costosos y potencialmente dañinos para el medio ambiente como la cal y el cemento. En Perú, donde las infraestructuras viales enfrentan desafíos debido a la variabilidad climática y la geografía accidentada, esta técnica podría mejorar no solo la calidad de las carreteras, sino también reducir determinados costos y procesos de reconstrucción a largo plazo [10].

Otro ejemplo es en el que se investigó el uso combinado de CCH y residuos plásticos para estabilizar suelos. Este estudio resaltó cómo la integración de estos materiales contribuye a la sostenibilidad en la construcción, reduciendo la dependencia de materiales tradicionales y fomentando la reutilización de desechos. Los hallazgos demostraron que la CCH incrementa significativamente el $f'c$ del suelo, mientras que los residuos plásticos mejoran su flexibilidad y durabilidad. Este enfoque resulta especialmente útil en zonas con recursos escasos y desafíos en la gestión de residuos, como en Apurímac. El empleo de desechos industriales y agrícolas no solo optimiza las propiedades del suelo, sino que también enfrenta problemas ambientales clave. La investigación propone que estas técnicas pueden representar una solución sostenible e integral para la construcción en regiones rurales y en vías de desarrollo [11].

La pavimentación de suelos arcillosos en la Avenida Ancohayllo, Apurímac, enfrenta un desafío crucial debido a las propiedades expansivas de estos suelos, que tienden a

reducir su capacidad de carga y aumentar su plasticidad, comprometiendo la solidez y longevidad de la infraestructura vial [12]. Para enfrentar esta problemática, el empleo de residuos calcinados de cáscara de huevo como estabilizador ha emergido como una alternativa potencialmente eficaz. Como estabilizador ha surgido como una solución potencialmente efectiva. Sin embargo, es fundamental evaluar y adaptar esta tecnología a las condiciones geológicas y del clima específicas de la región, asegurando que los beneficios observados en otros contextos internacionales se traduzcan en mejoras concretas para las carreteras peruanas.

3. METODOLOGÍA

En el presente estudio se empleó el método científico bajo un enfoque explicativo y un diseño cuasi-experimental. Se trabajó con una población conformada por 72 ensayos de subrasantes arcillosas estabilizadas mediante la incorporación CCH. La muestra fue censal, considerando la totalidad de los ensayos realizados. El estudio se desarrolló bajo los lineamientos de una investigación aplicada, ya que su propósito fue mejorar la estabilidad de las subrasantes arcillosas a través del uso de materiales orgánicos como la CCH, permitiendo obtener soluciones específicas a problemáticas en infraestructura vial.

Los ensayos realizados se detallan a continuación:

Tabla 1. Cantidad de ensayos por dosificación de CCH. Fuente: los autores

ENSAYO	0%	10%	15%	20%
Índice de Soporte de California	3	3	3	3
Límite Líquido	3	3	3	3
Límite Plástico	3	3	3	3
Índice de plasticidad	3	3	3	3
Densidad máxima	3	3	3	3
Humedad óptima	3	3	3	3
TOTAL	72			

El diseño cuasi-experimental permitió la manipulación de la variable independiente, representada por la CCH en proporciones de

0%, 10%, 15% y 20%, y la evaluación de su impacto sobre la estabilización de subrasantes arcillosas. Para ello, se compararon las propiedades mecánicas del suelo tratado con CCH columnas 10%, 15%, 20% en la Tabla 1, frente a muestras no estabilizadas columna 0%.

3.1. Caracterización de los Materiales

Inicialmente se procedió con la caracterización de los materiales empleados, esto mediante la determinación de su granulometría máxima, contenido higroscópico y clasificación geotécnica acorde

con los sistemas AASHTO [13] y SUCS [14]. Los resultados (ver Tabla 2) muestran que el tamaño máximo de las partículas presenta una consistencia en todas las muestras analizadas manteniéndose en $\frac{3}{4}$ " tanto para el suelo natural como para los grupos experimentales. Esta uniformidad asegura que las variaciones observadas en etapas posteriores sean atribuidas exclusivamente a los aditivos empleados y no a comportamientos externos y/o fallas intrínsecas. Adicionalmente se evidencian condiciones homogéneas respecto a la consistencia de los ensayos mecánicos subsiguientes.

Tabla 2. Caracterización de materiales de acuerdo a AASHTO [13] y SUCS [14]. Fuente: los autores

Espécimen	Grupo Experimental	Tamaño máximo (Pulgadas)	Contenido de humedad (%)	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS
1	GC: Suelo Natural (Patrón)	3/4	14	A-6(11)	CL
2	GC: Suelo Natural (Patrón)	3/4	15	A-6(9)	CL
3	GC: Suelo Natural (Patrón)	3/4	14	A-6(10)	CL
4	GE 1: Suelo + 10 % CCH	3/4	13	A-6(8)	CL
5	GE 1: Suelo + 10 % CCH	3/4	12	A-6(8)	CL
6	GE 1: Suelo + 10 % CCH	3/4	14	A-6(8)	CL
7	GE 2: Suelo + 15 % CCH	3/4	13	A-7-6(8)	CL
8	GE 2: Suelo + 15 % CCH	3/4	13	A-7-6(8)	CL
9	GE 2: Suelo + 15 % CCH	3/4	13	A-7-6(8)	CL
10	GE 3: Suelo + 20 % CCH	3/4	13	A-7-6(8)	CL
11	GE 3: Suelo + 20 % CCH	3/4	12	A-7-6(8)	CL
12	GE 3: Suelo + 20 % CCH	3/4	13	A-7-6(8)	CL

En cuanto al contenido de humedad, las muestras de suelo natural mostraron valores comprendidos entre 0,14% y 0,15% que se contrasta con las muestras tratadas con 10% de CCH las cuales tuvieron valores menores que oscilan entre 0,12% y 0,14%, así como los valores identificados a las muestras con un 15% de adición en donde la estabilización fue cercana al 0,13%. Este leve descenso en el contenido higroscópico sugiere una interacción química entre la ceniza y las propiedades hidrofílicas del suelo, que podría influir en su comportamiento durante los procesos de compactación y carga mecánica [12]. Dicho comportamiento será evaluado a profundidad en las etapas experimentales subsiguientes.

Respecto a la clasificación geotécnica, el sistema AASHTO [13] ubicó al suelo natural dentro de la categoría A-6, con índices de grupo que fluctuaron entre 9 y 11. Este perfil

se mantuvo para las muestras tratadas con un 10% de ceniza, mientras que las sometidas a un 15% de aditivo realizaron una transición hacia la categoría A-7-6, evidenciando un incremento en la plasticidad. Estos resultados se alinean con las propiedades químicas del aditivo, cuya incorporación en mayores proporciones podría estar incrementando la sensibilidad plástica del material.

3.2. Variable Adición de Ceniza de Cáscara de Huevo

La ceniza de cáscara de huevo, un subproducto derivado de la calcinación de cáscaras de huevo, está compuesta principalmente por CaCO_3 , ya que material ha demostrado en diversos estudios su capacidad para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, como la reducción de la plasticidad y el aumento de la resistencia a la compresión del suelo [15, 16].

En este estudio, la CCH se empleó como estabilizador del suelo, siendo la variable manipulada en los ensayos experimentales. Su eficacia como material estabilizador fue medida a través del impacto que tiene en las propiedades de la subrasante arcillosa. La incorporación de este subproducto agrícola fue fundamental para evaluar su potencial como una alternativa sostenible y eficiente en la estabilización de suelos, especialmente en contextos donde se considera el impacto ambiental y económico como prioridades.

3.3. Variable Dependiente Estabilización de Suelos Arcillosos

La estabilización de subrasante arcillosa se refiere al proceso mediante el cual se mejoran ciertas propiedades de los suelos, en particular de carreteras. Este proceso involucra la adición de estabilizadores para aumentar la resistencia, reducir la plasticidad y mejorar la capacidad de soporte del suelo [16, 1]. En este proyecto, la estabilización de subrasante arcillosa se consideró como variable dependiente, ya que la mejora de esta fue el principal resultado esperado tras la incorporación de ceniza de cáscara de huevo. Mejorar la estabilización de subrasantes arcillosas fue crucial para garantizar la durabilidad y seguridad de las infraestructuras viales.

3.4. Recolección de Datos

Los instrumentos de recolección de datos son herramientas clave para obtener información relevante en el contexto de la investigación. En estudios experimentales, como el presente, se utilizan comúnmente formatos estandarizados para la medición de variables, lo que asegura que los datos recolectados sean consistentes y precisos [17]. Se emplearon formatos de ensayos en laboratorio para registrar los resultados relacionados con la resistencia, plasticidad y compactación de las subrasantes tratadas y no tratadas.

El proceso se estructuró en tres fases principales que aseguraron la precisión en la recolección, preparación y análisis de las muestras, garantizando la validez de los resultados obtenidos

Toma de muestra

La etapa inicial consistió en la obtención de muestras de suelo del área de análisis. Para este fin, se utilizaron diversas herramientas de extracción para obtener tres calicatas, cada una con un peso aproximado de 40 kg. Estas permitieron evaluar la estratigrafía del terreno, proporcionando información crucial sobre las capas del suelo y sus características físicas. Las muestras fueron cuidadosamente etiquetadas y transportadas al laboratorio en bolsas de polipropileno para preservar el índice de humedad del suelo y evitar alteraciones durante el transporte.

Para la preparación del agente estabilizador CCH, el proceso incluyó:

- Recolección de las cáscaras de huevo.
- Secado al sol durante 5 a 7 días para eliminar la humedad residual.
- Molienda de las cáscaras en un molino manual para facilitar la calcinación.
- Calcinación en un horno a temperaturas controladas entre 400°C y 600°C para obtener la ceniza que se utilizó como estabilizador del suelo.

Mecánica de suelos

En la segunda fase, se realizaron ensayos de laboratorio para analizar detalladamente las propiedades y cualidades mecánicas. Antes de los ensayos, las muestras de suelo fueron cuarteadas para asegurar una porción representativa y homogénea en cada prueba. Se incorporó la CCH a una porción de las muestras de suelo para evaluar su efecto sobre las propiedades mecánicas, comparando los resultados con las muestras no tratadas.

3.5. Análisis en Gabinete

La etapa final consistió en registrar los datos obtenidos en una hoja de cálculo de Excel. Esto permitió organizar la información, realizar cálculos necesarios y seguir las normas y procedimientos estándar establecidos en la literatura técnica. Se realizó un análisis comparativo entre las muestras tratadas y no tratadas, proporcionando evidencia empírica sobre la eficacia del agente estabilizador.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Valor de Soporte

La Tabla 3 presenta los valores promedio del índice CBR obtenidos para cada grupo experimental, permitiendo una comparación

clara entre las distintas proporciones de CCH utilizadas en las muestras. Estos datos reflejan directamente el impacto del aditivo en la capacidad portante del suelo, estableciendo una base cuantitativa para su análisis.

Tabla 3. Valores promedio del índice CBR. Fuente: los autores

Espécimen N°	Grupo Experimental	Calicata - Muestra	Índice California Bearing Ratio (CBR) (0,1" - 95% MDS)	Promedio Índice California Bearing Ratio (CBR) (0,1" - 95% MDS)
1	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M1	6,00	7,80
2	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M2	8,50	
3	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M3	8,90	
4	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M1	10,60	10,60
5	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M2	10,20	
6	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M3	11,00	
7	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M1	11,60	11,60
8	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M2	11,30	
9	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M3	11,90	
10	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M1	13,40	13,40
11	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M2	12,80	
12	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M3	14,00	

Los valores promedio del índice CBR, presentados en la Tabla 3, evidencian un incremento progresivo en la capacidad de soporte del suelo tratado con CCH. El patrón registró un índice promedio de 7,80%, que sirve como punto de referencia basal. En contraste, el grupo experimental con un 10% de ceniza alcanzó un promedio de 10,60%, reflejando un aumento del 35,90% respecto al grupo control. Este incremento significativo puede atribuirse a la mejora en la cohesión interna y compactación del suelo debido a la interacción química del aditivo con las partículas arcillosas.

En la Figura 1 se observa una tendencia claramente ascendente, con el grupo tratado con un 15% de ceniza alcanzando un promedio de 11,60%, lo que equivale a una mejora del 48,72% en comparación con el suelo natural. Este resultado respalda la hipótesis de que una mayor proporción del aditivo optimiza las propiedades mecánicas del suelo, favoreciendo un desempeño más robusto frente a cargas aplicadas. La representación gráfica resalta cómo las proporciones crecientes de ceniza contribuyen directamente a mejorar la resistencia del suelo.

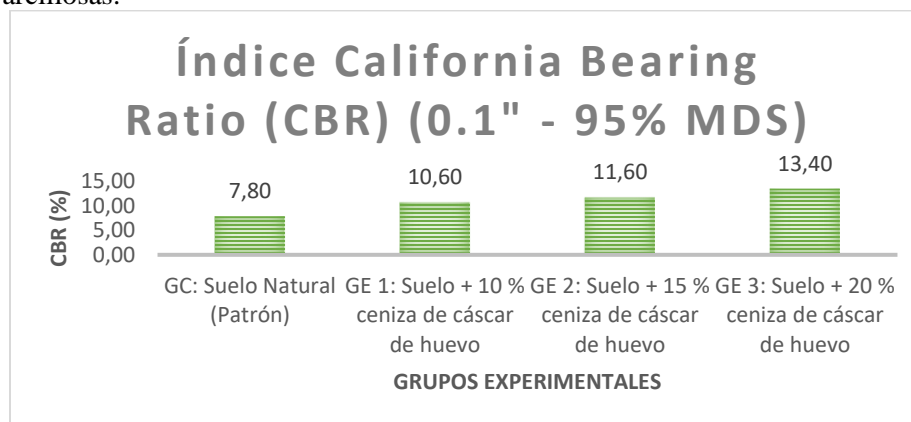


Figura 1. Valores promedio del índice CBR. Fuente: los autores

Por su parte, la Figura 2 muestra que el grupo

experimental con un 20% de ceniza obtuvo el índice CBR más alto, con un promedio de

13,40%. Este valor representa un incremento del 71,79%, consolidando la efectividad del aditivo en la estabilización del suelo. Sin embargo, los datos también sugieren una tendencia hacia la estabilización del índice CBR a medida que se incrementa la

proporción de ceniza, lo cual podría interpretarse como una limitación inherente en la capacidad del suelo para asimilar mayores concentraciones del aditivo sin alcanzar un umbral de saturación química.

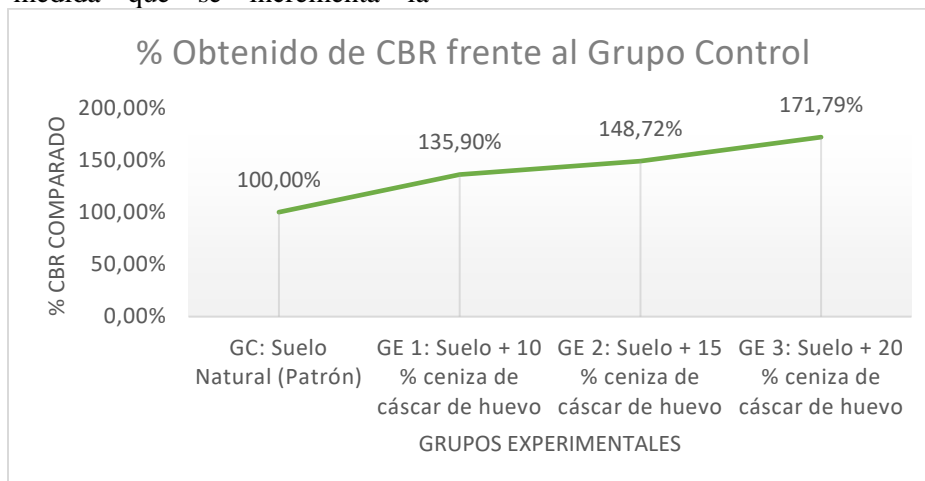


Figura 2. Porcentaje obtenido de CBR frente al grupo patrón. Fuente: los autores

Los datos identificados confirman la eficacia del uso de CCH como estabilizador en los suelos arcillosos, manifestando incrementos notables en el índice CBR en proporciones de 10%, 15% y 20%, lo que sostiene el uso de este material orgánico en diversos proyectos de infraestructura de forma innovadora y sostenible con el medio ambiente. Las observaciones realizadas en proporciones del 15% y 20% resaltan su relevancia en

escenarios que demanden una maximización de la capacidad portante en condiciones exigentes.

4.2. Plasticidad

La Tabla 4 muestra tanto los valores individuales como los promedios obtenidos en el IP, LI y LP de cada grupo experimental, el cual permite evaluar de forma precisa la variación en la plasticidad. en respuesta a la incorporación progresiva de CCH.

Tabla 4. Índice de plasticidad evaluado. Fuente: los autores

Espécimen N°	Grupo Experimental	Calicata - Muestra	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)	Promedio Índice de Plasticidad (%)
1	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M1	38	18	20	19
2	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M2	36	18	18	
3	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M3	37	18	19	
4	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M1	40	22	18	18
5	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M2	41	22	19	
6	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M3	40	22	18	
7	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M1	41	23	18	18
8	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M2	41	23	18	
9	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M3	41	23	18	
10	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M1	42	25	17	17
11	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M2	43	25	18	
12	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M3	41	25	16	

Los resultados reportados en la Tabla 4 evidencian que el patrón presenta un IP

promedio de 19%, estableciendo la referencia inicial para el análisis comparativo. En el

grupo tratado con un 10% de CCH (GE 1), el IP promedio se redujo a 18%, representando una disminución del 3,51% respecto al control. De manera similar, el grupo experimental con un 15% de ceniza (GE 2) mostró una estabilidad en el IP promedio de 18%, lo que refleja una reducción acumulada del 1,75%. Finalmente, el grupo con un 20% de ceniza (GE 3) alcanzó el valor más bajo, con un IP promedio de 17%, logrando una reducción total del 5,26%. Estos resultados subrayan la efectividad del aditivo en disminuir la plasticidad del suelo, generando un material más estable y menos deformable, óptimo para aplicaciones geotécnicas exigentes.

En la Figura 3 se observa una tendencia decreciente en el IP conforme aumenta la proporción de CCH. Mientras que el suelo natural muestra el IP más alto (19%), los grupos experimentales tratados con 10% y 15% de ceniza reducen el IP a 18%, y el grupo con 20% lo disminuye a 17%. Esta tendencia confirma que la inclusión del aditivo mejora las características de plasticidad del suelo, haciéndolo menos susceptible a deformaciones plásticas excesivas bajo carga, lo cual es una condición esencial para su uso en estructuras sometidas a cargas dinámicas o estáticas.

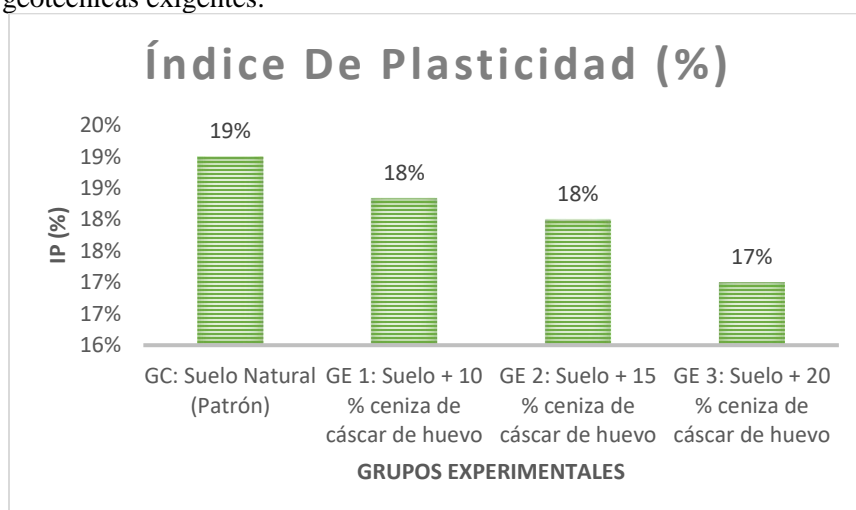


Figura 3. Comparación de índices de plasticidad. Fuente: los autores

Los datos identificados en la Figura 4 indican que el grupo experimental 1 (10% de adición de CCH) mantiene un 96,49% de IP respecto

al grupo control, por otro lado, el grupo experimental 2 (15%) manifestó un 94,74% y finalmente el grupo experimental 3 (20%) mostró un 89,47%.

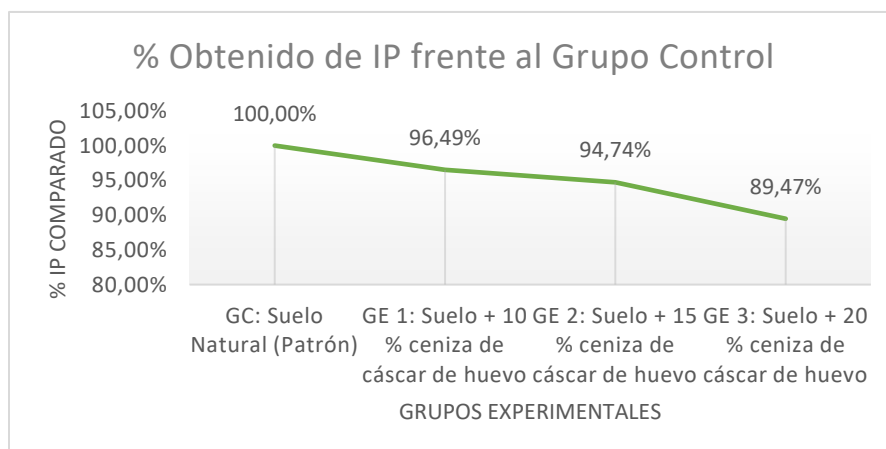


Figura 4. Porcentaje obtenido del IP frente al grupo control. Fuente: los autores

Estos resultados indican una tendencia decreciente proporcionalmente consistente lo que refleja que el aumento en la proporción de aditivo aumenta progresivamente la plasticidad del suelo. Los datos obtenidos previamente indican que la incorporación de CCH como estabilizador es efectivo en suelos arcillosos sobre todo en términos de reducción del IP, esta reducción progresiva se correlaciona directamente con las proporciones de aditivo incluido destacando la viabilidad de uso. Asimismo, estos resultados sugieren que el uso de CCH contribuye a la optimización de las propiedades mecánicas.

4.3. Compactación

La Tabla 5 sintetiza los valores promedio de MDS alcanzados por los diferentes grupos experimentales, permitiendo evaluar el efecto directo de la CCH en la densidad del suelo compactado. Este análisis es clave para entender las mejoras en el desempeño mecánico del suelo tras el tratamiento.

La Figura 5 confirma un incremento significativo en la MDS con la adición del 10% de ceniza, seguido de una estabilización en los grupos con proporciones mayores. Este patrón sugiere que, si bien la CCH mejora la densidad del suelo, existe un punto óptimo en el que el beneficio adicional disminuye.

Tabla 5. Slump para ambos métodos. Fuente: los autores

Espécimen N°	Grupo Experimental	Calicata - Muestra	Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	Promedio Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)
1	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M1	1,641	1,670
2	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M2	1,666	
3	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M3	1,702	
4	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M1	1,720	1,720
5	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M2	1,700	
6	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M3	1,740	
7	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M1	1,718	1,718
8	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M2	1,710	
9	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M3	1,726	
10	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M1	1,712	1,712
11	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M2	1,709	
12	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M3	1,715	

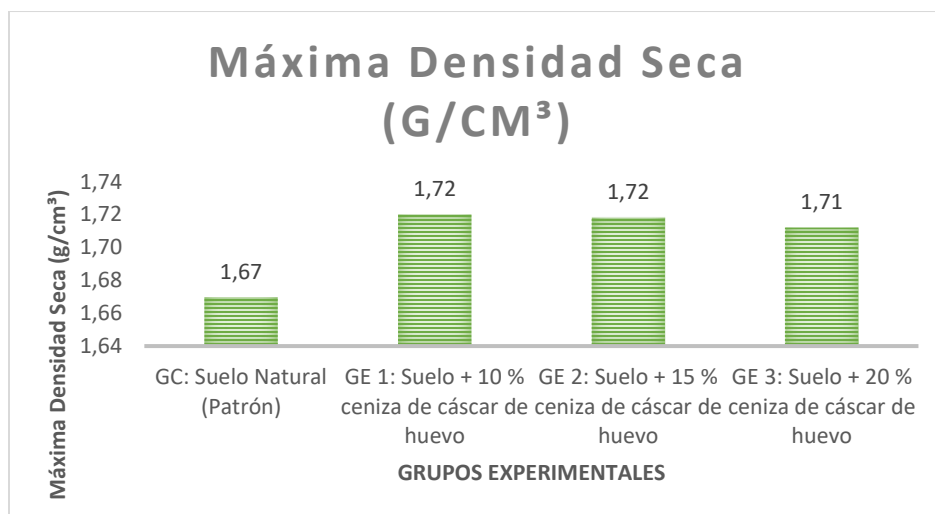


Figura 5. Comparación de MDS estudiados. Fuente: los autores

La Figura 6 compara el porcentaje relativo de MDS para cada grupo experimental respecto al

grupo control. Este análisis proporciona una perspectiva clara del impacto del aditivo en la

densidad del suelo. El grupo experimental con 10% de ceniza (GE 1) alcanza un 103,01% de la MDS del grupo control, mientras que los grupos con 15% y 20% de ceniza logran 102,89% y 102,54%, respectivamente. Estos

resultados respaldan que el incremento en la densidad seca es máximo al incorporar un 10% de ceniza, pero disminuye levemente en proporciones mayores, probablemente debido a una saturación del suelo.

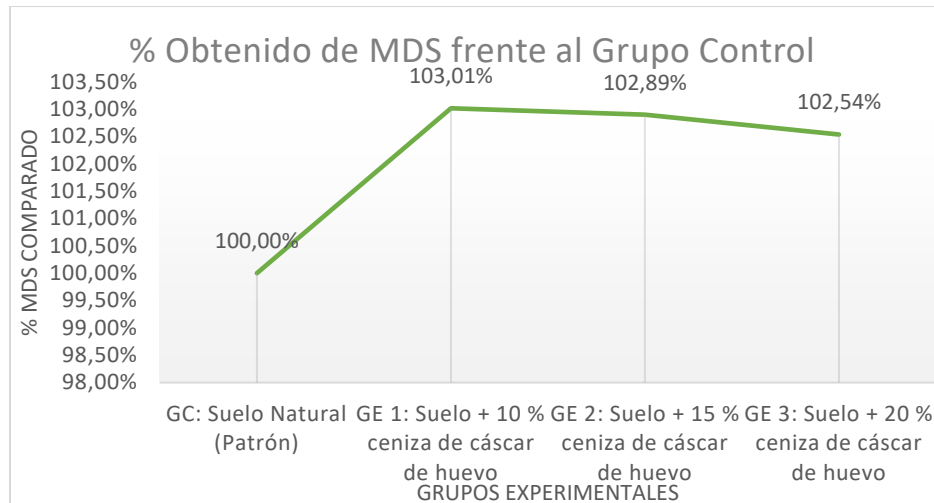


Figura 6. Porcentaje obtenidos de MDS frente al grupo control. Fuente: los autores

La Tabla 6 presenta los valores promedio del OCH para cada grupo experimental. Este parámetro es útil para identificar la cantidad de agua requerida para alcanzar su compactación

máxima del suelo tratado.

Tabla 6. Slump para ambos métodos. Fuente: los autores

Especimen N°	Grupo Experimental	Calicata - Muestra	Óptimo Contenido de Humedad (%)	Promedio Óptimo Contenido de Humedad (%)
1	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M1	20,6%	19,40%
2	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M2	19,1%	
3	GC: Suelo Natural (Patrón)	C1-M3	18,5%	
4	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M1	18,4%	18,40%
5	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M2	18,2%	
6	GE 1: Suelo + 10 % CCH	C2-M3	18,6%	
7	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M1	18,2%	18,20%
8	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M2	18,0%	
9	GE 2: Suelo + 15 % CCH	C3-M3	18,4%	
10	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M1	17,6%	17,60%
11	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M2	17,5%	
12	GE 3: Suelo + 20 % CCH	C4-M3	17,7%	

El suelo natural presenta un OCH promedio de 19,40%, que se utiliza como referencia inicial. El grupo experimental con un 10% de ceniza (GE 1) muestra una reducción significativa del 5,15%, alcanzando un OCH de 18,40%. Respecto a los GE2 y GE3 los valores que manifiestan son de 18,20% y 17,60% respectivamente, representando

disminuciones adicionales del 1,03% y 3,09%, indicando que la CCH reduce consistentemente la cantidad de agua necesaria para la compactación. La Figura 7 evidencia que el OCH disminuye progresivamente con el incremento de la proporción de CCH. Este comportamiento sugiere que el aditivo mejora la capacidad del

suelo para compactarse con menores cantidades de agua, incrementando la eficiencia del proceso.

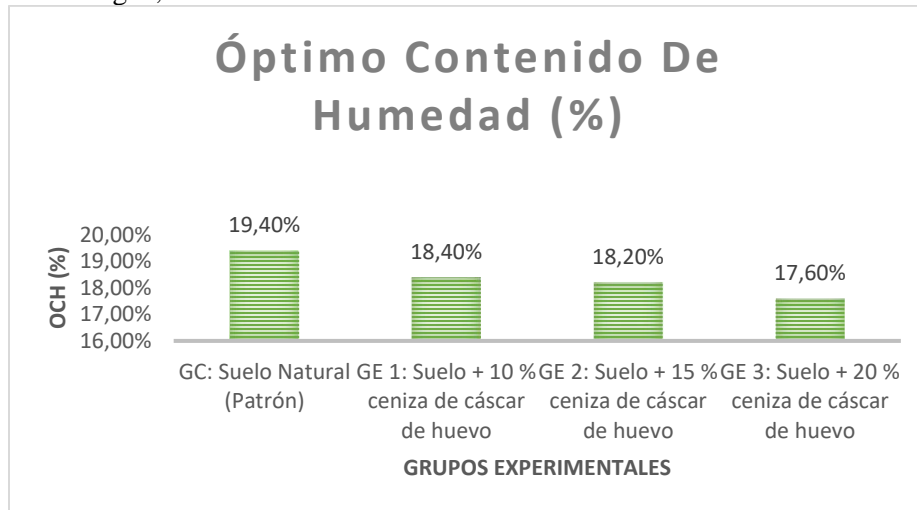


Figura 7. Comparación de OCH estudiados. Fuente: los autores

La Figura 8 compara el porcentaje relativo del OCH de cada grupo experimental respecto al grupo control. Este enfoque proporcional permite evaluar la efectividad del aditivo en la reducción del OCH. El grupo experimental con 10% de ceniza (GE 1) conserva un 94,85%

del OCH del grupo control, mientras que los grupos con 15% y 20% de ceniza alcanzan con 93,81% y 90,72%, respectivamente, con lo cual se confirma que la adición de CCH reduce de forma consistente el OCH mejorando la eficiencia hídrica del suelo compactado.

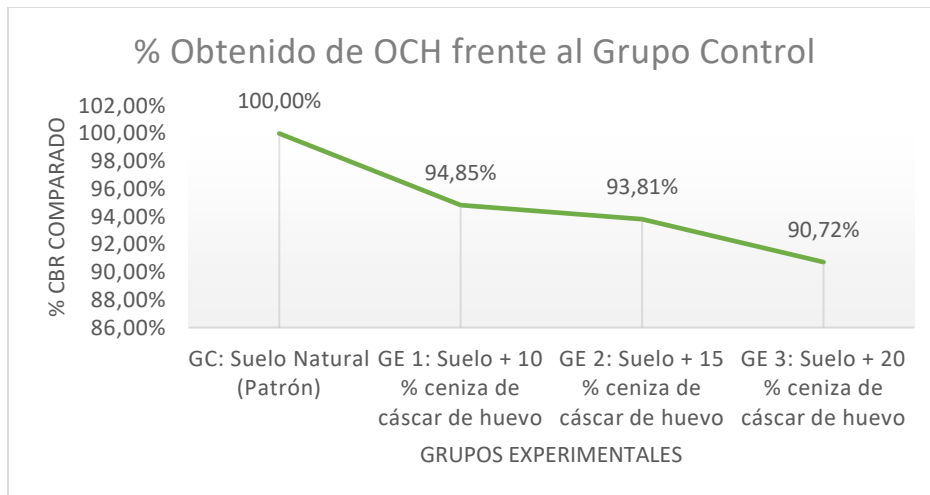


Figura 8. Porcentaje obtenido de OCH frente al grupo control. Fuente: los autores

4.4. Análisis Estadístico

Valor de soporte

Se empleó el análisis estadístico de Shapiro-Wilk [18], apropiado para conjuntos de datos con menos de 50, a fin de determinar la suposición planteada. Dicho estudio hizo posible identificar si los subconjuntos de datos presentaban una distribución normal. En este

contexto, la hipótesis nula (H0) sugiere que los datos no evidenciaban una distribución normal, mientras que el planteamiento alternativo (H1) proponía lo contrario. Los resultados indican que todos los valores de significancia para los subconjuntos analizados son de 1,000 superando de forma considerable el valor de significancia establecido de 0,05, identificados en la Tabla 7. Por lo cual tras el

correspondiente análisis se rechaza la H0 y se acepta la H1 sugiriendo que los valores son completamente normales.

Tabla 7. Prueba de normalidad para CBR.
Fuente: los autores

Indicador	Tipo de mortero	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Valor de soporte	GC (0%)	1,000	3	1,000
	GE 1 (10%)	1,000	3	1,000
	GE 3 (15%)	1,000	3	1,000
	GE 4 (20%)	1,000	3	1,000

El análisis de homogeneidad para el CBR con la adición de CCH, mediante la prueba de Levene [19] en la cual se establece que la H0 no hay homogeneidad mientras que la H1 confronta esta afirmación. Es de esta forma que los resultados indican que los valores de significancia en todas las condiciones son superiores a 0,05 como se evidencian en la Tabla 8. Por lo tanto, se rechaza la H0 confirmando que las varianzas entre los grupos experimentales y de control son homogéneas.

Tabla 8. Prueba de homogeneidad para CBR.
Fuente: los autores

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
	Se basa en la mediana	0,718	3	8	0,569
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0,718	3	5,124	0,582
	Se basa en la media recortada	0,718	3	8	0,569

Asimismo, se realizó el análisis de varianza ANOVA [20] para el valor de soporte con la adición de CCH, estos resultados indican un

valor de significancia de 0,000 el cual es menor al p. valor de 0,05 tal y como se muestra en la Tabla 9, resaltando una variación significativa entre los grupos analizados, es por ello que se rechaza la H0 y se acepta la H1 que establece que la adición de CCH genera un efecto significativo en el valor de soporte del suelo.

Tabla 9. Análisis de varianzas para CBR.
Fuente: los autores

Descripción	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	49,290	3	16,430	101,108	0,000
Dentro de grupos	1,300	8	0,163		
Total	50,590	11			

Asimismo, se realizó la comparación múltiple con el Post-Hoc de Tukey [21] para el valor de soporte con la adición de CCH, este análisis permitió comparar las medias entre los diferentes grupos experimentales identificando combinaciones con diferencias significativas. Los resultados indican que todas las comparaciones realizadas presentan valores de significancia menores a 0,05 demostrando diferencias significativas en las medias observadas entre el grupo control y los grupos experimentales, los cuales fueron progresivamente mayores a medida que se incrementó el porcentaje de CCH tal y como de evidencia en la Tabla 10. Por lo tanto, todas las adiciones han generado un mayor valor de CBR, siendo la adición el GE 3 con un 20% de CCH la que ha generado el mayor beneficio.

Tabla 8. Prueba de Tukey para CBR. Fuente: los autores

(I) Ceniza de cáscara de huevo	(J) Ceniza de cáscara de huevo	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
GC (0%)	GE 1 (10%)	-2,80000*	0,32914	0,000	-3,8540	-1,7460
	GE 3 (15%)	-3,80000*	0,32914	0,000	-4,8540	-2,7460
	GE 4 (20%)	-5,60000*	0,32914	0,000	-6,6540	-4,5460

Plasticidad

Los resultados indican que todos los valores de significancia para los subconjuntos analizados

son mayores a 0,05 tal y como se muestra en la Tabla 11, sugiriendo que los valores en el indicador de plasticidad de la subrasante son completamente normales.

Tabla 11. Prueba de normalidad para la plasticidad. Fuente: los autores

Indicador	Tipo de mortero	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Plasticidad de la subrasante	GC (0%)	1,000	3	1,000
	GE 1 (10%)	0,980	3	0,732
	GE 3 (15%)	0,988	3	0,794
	GE 4 (20%)	1,000	3	1,000

A continuación, se realizó el análisis de homogeneidad de varianzas para la plasticidad de la subrasante con la adición de ceniza de cáscara de huevo, el cual se llevó a cabo mediante la prueba de Levene [19] en la cual se establece que la H0 indica que las varianzas

no son homogéneas mientras que la H1 confronta esta afirmación. Es de esta forma que los resultados indican que los valores de significancia en todas las condiciones son superiores a 0,05 como se evidencian en la Tabla 12.

Tabla 12. Prueba de homogeneidad para la plasticidad. Fuente: los autores

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Plasticidad de la subrasante	Se basa en la media	1,684	3	8	0,247
	Se basa en la mediana	1,222	3	8	0,363
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1,222	3	6,000	0,380
	Se basa en la media recortada	1,664	3	8	0,251

Asimismo, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) [20] para la plasticidad de la subrasante con la adición de CCH, estos resultados indican un valor de significancia de 0,067 el cual es mayor al p. valor de 0,05 tal y como se muestra en la Tabla 13, resaltando que no existe una variación significativa entre los grupos analizados, es por ello que se acepta la H0 y se rechaza la H1, por lo que la adición de

CHH no genera un efecto significativo en la plasticidad de la subrasante.

Tabla 13. Análisis de varianzas para la plasticidad. Fuentes: los autores

Descripción	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	6,250	3	2,083	3,571	0,067
Dentro de grupos	4,667	8	0,583		
Total	10,917	11			

Compactación

Los resultados indican que todos los valores de significancia para los subconjuntos analizados

son mayores a 0,05 tal y como se muestra en las Tabla 14 y 15, sugiriendo que los valores en el indicador de plasticidad de la subrasante son completamente normales.

Tabla 14. Prueba de normalidad de MDS. Fuente: los autores

Indicador	Tipo de mortero	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Máxima densidad seca	GC (0%)	0,989	3	0,802
	GE 1 (10%)	1,000	3	1,000
	GE 3 (15%)	0,992	3	0,826
	GE 4 (20%)	1,000	3	1,000

Tabla 15. Prueba de normalidad de OCH. Fuente: los autores

Indicador	Tipo de mortero	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Óptimo contenido de humedad	GC (0%)	0,942	3	0,537
	GE 1 (10%)	1,000	3	1,000
	GE 3 (15%)	1,000	3	1,000
	GE 4 (20%)	1,000	3	1,000

A continuación, se realizó el análisis de homogeneidad de varianzas para tanto para la MDS y la OCH de la subrasante con la adición de ceniza de cáscara de huevo, el cual se llevó a cabo mediante la prueba de Levene [19] en la cual se establece que la H0 indica que las

varianzas no son homogéneas mientras que la H1 confronta esta afirmación. Es de esta forma que los resultados indican que los valores de significancia en todas las condiciones son superiores a 0,05 como se evidencian en las Tablas 16 y 17.

Tabla 16. Prueba de homogeneidad para MDS. Fuente: los autores

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig,
Máxima densidad seca	Se basa en la media	1,624	3	8	0,259
	Se basa en la mediana	1,133	3	8	0,392
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1,133	3	4,88 5	0,421
	Se basa en la media recortada	1,593	3	8	0,266

Tabla 17. Prueba de homogeneidad para OCH. Fuente: los autores

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Óptimo contenido de humedad	Se basa en la media	5,981	3	8	0,019
	Se basa en la mediana	1,754	3	8	0,233
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1,754	3	2,214	0,369
	Se basa en la media recortada	5,568	3	8	0,089

Asimismo, se realizó el análisis de varianza ANOVA [20] tanto para la MDS y el OCH de la subrasante con la adición de CCH, estos resultados indican un valor de significancia de 0,035 el cual es

menor al p. valor de 0,05 tal y como se muestra en las Tablas 18 y 19.

Tabla 18. *Análisis de varianzas para MDS. Fuente: los autores*

Descripción	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0,006	3	0,002	4,735	0,035
Dentro de grupos	0,003	8	0,000		
Total	0,010	11			

Tabla 19. *Análisis de varianzas para OCH. Fuente: los autores*

Descripción	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	5,040	3	1,680	5,333	0,026
Dentro de grupos	2,520	8	0,315		
Total	7,560	11			

Asimismo, se realizó la comparación múltiple con el Post-Hoc de Tukey [21] tanto para la MDS y el OCH con la adición de CCH, este análisis permitió comparar las medias entre los diferentes grupos experimentales identificando combinaciones con diferencias significativas. Los resultados indican, para la MDS que solo el GE 2 (15%) tuvo un p. valor menor a 0,05 demostrando diferencias significativas en las medias observadas entre el

grupo control y los grupos experimentales, en cuanto al OCH, solo el GE 3 (20%) ha logrado un p. valor menor a 0,05, tal y como de evidencia en la tabla 20 y 21. Por lo cual, la CCH si genera una diferencia significativa en las características de compactación del suelo de subrasante, siendo los GE 2 y GE 3, las que han generado este efecto.

Tabla 20. *Prueba de Tukey para MDS. Fuente: los autores*

(I) Ceniza de cáscara de huevo	(J) Ceniza de cáscara de huevo	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
GC (0%)	GE 1 (10%)	-0,05033	0,01690	0,069	-0,1044	0,0038
	GE 3 (15%)	-,05833*	0,01690	0,035	-0,1124	-0,0042
	GE 4 (20%)	-0,04233	0,01690	0,133	-0,0964	0,0118

Tabla 21. *Prueba de Tukey para CBR. Fuente: los autores*

(I) Ceniza de cáscara de huevo	(J) Ceniza de cáscara de huevo	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
GC (0%)	GE 1 (10%)	1,00000	0,45826	0,208	-0,4675	2,4675
	GE 3 (15%)	1,20000	0,45826	0,114	-0,2675	2,6675
	GE 4 (20%)	1,80000*	0,45826	0,018	0,3325	3,2675

5. CONCLUSIONES

Los hallazgos de esta investigación confirman que la ceniza de cáscara de huevo (CCH) representa una alternativa efectiva para mejorar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso en la Av. Alisos, Anccohayllo, Apurímac. A través del análisis de indicadores clave, como el índice de soporte California (CBR), la densidad máxima seca (MDS) y el contenido óptimo de humedad (OCH), se evidenció que la adición de este material no solo optimiza el comportamiento del suelo, sino que también refuerza su viabilidad como estabilizador en proyectos viales sostenibles. Estos resultados resaltan el potencial de la CCH como un insumo económico y ecológico para la construcción, promoviendo alternativas más eficientes y responsables con el medio ambiente.

En relación con la capacidad portante del suelo, la aplicación de un 20% de CCH permitió incrementar significativamente el valor del CBR, pasando de 7,80% a 13,40%, lo que representa una mejora del 71,79%. Este incremento evidencia un refuerzo estructural considerable, asegurando una mayor estabilidad para infraestructuras viales y prolongando la vida útil de los pavimentos en condiciones exigentes. Estos resultados consolidan la CCH como una solución técnica viable en el campo de la ingeniería geotécnica.

Por otro lado, respecto a la plasticidad del suelo, la incorporación de la CCH logró una reducción moderada en el índice de plasticidad, disminuyendo de 19% a 17%, lo que equivale a un 5,26% de mejora. Aunque este cambio no fue estadísticamente significativo, sugiere que la combinación de la CCH con otros estabilizadores podría potenciar aún más su efectividad. Esto resalta la necesidad de estudios complementarios que analicen posibles sinergias entre materiales estabilizantes, con el objetivo de optimizar el comportamiento mecánico del suelo y garantizar su estabilidad en diversas condiciones ambientales.

Finalmente, el impacto de la CCH en la compactación del suelo también fue evidente. La densidad máxima seca (MDS) aumentó de

1,67 g/cm³ a 1,71 g/cm³, mientras que el contenido óptimo de humedad (OCH) se redujo de 19,40% a 17,60%. Estas mejoras reflejan un suelo tratado con mayor capacidad de soporte de cargas y menores requerimientos de humedad, lo que optimiza los procesos constructivos y reduce costos operativos. Además, estos avances contribuyen a una gestión más eficiente y sostenible de los recursos, alineándose con las tendencias actuales en ingeniería civil.

En conclusión, la ceniza de cáscara de huevo se presenta como una alternativa prometedora en la estabilización de suelos arcillosos para infraestructura vial. Sus beneficios en resistencia, compactación y sostenibilidad refuerzan su aplicabilidad en proyectos de construcción, promoviendo soluciones innovadoras que combinan eficiencia estructural y responsabilidad ambiental.

6. FINANCIAMIENTO

Propio de los autores.

7. CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés en relación con la elaboración, desarrollo y publicación de este artículo. No se ha recibido financiamiento ni apoyo de entidades que pudieran influir en los resultados o interpretaciones presentadas en esta investigación.

8. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

J.R.O. planteamiento del problema; J.R.O. y R.A.R. pruebas de laboratorio, toma de muestra; análisis y redacción.

9. REFERENCIAS

- [1] M. Alzaidy, "Experimental study for stabilizing clayey soil with eggshell powder and plastic wastes," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 518, no. 2, p. 022008, 2019.
- [2] K. Veerabrahmam y D. Prasad, "A review on the effect of eggshell powder on engineering properties of expansive soil," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. 415–426, 2021
- [3] T. Teferra, E. Assefa, y S. M. Assefa,

- "Influence of Eggshell Ash and Stone Powder on the Properties of Expansive Soil," *Adv. Civ. Eng.*, Article ID 6690298, 2023.
- [4] M. Hasan, M. Syamsul, M. S. I. Zaini, y L. Khalid, "Effect of Optimum Utilization of Silica Fume and Eggshell Ash on Soil Stabilization," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 2021, pp. 1023–1035.
- [5] N. Sathiparan, "Utilization prospects of eggshell powder in sustainable construction material—A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 293, p. 123465, 2021.
- [6] U. Zada, K. Haleem, y A. Abbas, "Re-utilization of stone industry waste materials for stabilization of expansive soils," *NUST J. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 61–65, 2021.
- [7] R. Kour, "Use of Egg Shell Powder and Periwinkle Shell Ash for the Stabilization of Clayey Soil," *Indian Scientific Journal Of Research In Engineering And Management*, vol. 2023, no. 3, pp. 45–59.
- [8] J. Pineda Pineda, F. Sánchez del Castillo, A. Ramírez Arias, A. M. Castillo González, L. A. Valdés Aguilar, y E. d. C. Moreno Pérez, "Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo," *Chapingo Serie Horticultura*, vol. 18, no. 1, pp. 95–111, 2012.
- [9] S. Pourakbar, A. Asadi, and B. B. K. Haut, "Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement," *Transp. Geotech.*, vol. 4, pp. 24–35, 2025.
- [10] R. C. Seminario, "*Variabilidad de las propiedades de los ladrillos industriales de 18 huecos en la Piura*," Repositorio Institucional PIRHUA, Perú, 2013.
- [11] M. Syamsul, M. S. I. Zaini, and M. Hasan, "Effectiveness of Silica Fume Eggshell Ash and Kaolin Clay," *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 2023, no. 4, pp. 123–135.
- [12] M. S. I. Zaini, M. Syamsul, M. Hasan, y L. Khalid, "The effect of utilizing silica fume and eggshell ash on the geotechnical properties of soft kaolin clay," *J. Teknol.*, vol. 84, no. 1, pp. 159–170, 2022.
- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials, "*Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*", AASHTO, Washington, DC, 2021.
- [14] ASTM International, "*Unified Soil Classification System (SUCS)*," ASTM D2487-17, West Conshohocken, PA, 2017.
- [15] M. Freire y J. Holanda, "Characterization of avian eggshell waste aiming its use in a ceramic wall tile paste," *Cerâmica*, vol. 52, no. 240, pp. 240–244, 2006.
- [16] M. Carlina, Y. Apriyanti, y F. Fahriani, "The effect of addition of bagasse ash and eggshell powder on CBR value of clay soil," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 926, no. 1, p. 012102, 2021.
- [17] J. W. Creswell, "*Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*", 4th ed., SAGE Publications, 2014.
- [18] S. S. Shapiro y M. B. Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)," *Biometrika*, vol. 52, no. 3–4, pp. 591–611, 1965.
- [19] H. Levene, "*Robust tests for equality of variances*," in *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*, I. Olkin, Ed. Stanford, CA: Stanford University Press, 1960, pp. 278–292.
- [20] G. W. Snedecor y W. G. Cochran, "*Statistical Methods*", 8th ed., Ames, IA: Iowa State University Press, 1989.
- [21] J. W. Tukey, "Comparing individual means in the analysis of variance," *Biometrics*, vol. 5, no. 2, pp. 99–114, 1949.