


ARTÍCULO DE REVISIÓN

Estabilizadores de suelo a partir de ceniza de cáscara de arroz: Una revisión literaria

Soil stabilizers from rice husk ash: A literature review

Michael Lopez ¹* y Manuel Laurencio ²

RESUMEN

Los estabilizadores de suelos tradicionales, como el cemento y la cal, son caros y tienen un gran impacto ambiental, por lo que los ingenieros civiles necesitan encontrar urgentemente alternativas sostenibles. Las cenizas agroindustriales son un subproducto abundante y barato que resulta prometedor para mejorar los suelos con escasas cualidades geotécnicas. Este artículo pretende evaluar la eficacia del uso de las cenizas agroindustriales como la cáscara de arroz, como agentes estabilizadores mediante una revisión de la bibliografía. El objetivo es identificar los resultados de las investigaciones y resumir los conocimientos existentes sobre su impacto en las características mecánicas y físicas del suelo. Una revisión exhaustiva de la literatura sirve de base para el proceso. Para encontrar publicaciones pertinentes, se realizó una búsqueda sistemática utilizando palabras clave y criterios de inclusión/exclusión en bases de datos científicas como SciELO y Scopus. Para compilar el estado del arte sobre el tema, se examinaron y combinaron minuciosamente los datos extraídos de las investigaciones seleccionadas.

Palabras clave: Estabilización de suelos, cenizas de cáscara de arroz, sostenibilidad, propiedades puzolánicas, revisión literaria

ABSTRACT

Traditional soil stabilizers, such as cement and lime, are expensive and have a high environmental impact, so civil engineers urgently need to find sustainable alternatives. Agro-industrial ashes are an abundant and inexpensive by-product that holds promise for improving soils with poor geotechnical qualities. This paper aims to evaluate the effectiveness of using agro-industrial ashes such as rice husks as stabilizing agents through a review of the literature. The objective is to identify research results and summarize existing knowledge on their impact on soil mechanical and physical characteristics. A comprehensive literature review serves as the basis for the process. To find relevant publications, a systematic search using keywords and inclusion/exclusion criteria was performed in scientific databases such as SciELO and Scopus. To compile the state of the art on the topic, the data extracted from the selected research was thoroughly reviewed and combined.

Keywords: Soil stabilization, rice husk ash, sustainability, pozzolanic properties, literature review

* Autor para correspondencia

¹ Universidad Católica Sedes Sapientiae, Perú. Email: 2020200582@ucss.pe, mllaurencio@ucss.edu.pe

INTRODUCCIÓN

La optimización de las propiedades geotécnicas de los suelos es un desafío constante en la ingeniería civil, sobre todo en la construcción de carreteras, cimentaciones y otras obras de infraestructura. Dentro de los tipos de suelos, se encuentran los suelos arcillosos, la peculiaridad de los suelos arcillosos es que se dilatan cuando están húmedos y se contraen cuando se secan. Esto puede ser problemático, sobre todo para las estructuras construidas sobre ellos. (Bravo & Lopez, 2021). Este tipo de suelos se han estabilizado históricamente utilizando adiciones tradicionales como son la cal y el cemento Portland. A pesar de su reconocida eficacia, su fabricación tiene un gran coste económico y una importante influencia negativa en el medio ambiente, sobre todo por sus elevadas emisiones de dióxido de carbono y el intenso uso de energía y recursos no renovables.

Para resolver este problema, la investigación geotécnica se ha centrado en la búsqueda de materiales de bajo coste, sostenibles y alternativos que puedan sustituir parcial o totalmente a los estabilizantes convencionales. Siendo populares aquellos aditivos de origen agroindustrial, como el bagazo de caña de azúcar, que es un subproducto de la industria azucarera, que se utiliza sobre todo como combustible. En cambio, las cenizas de bagazo (CBA) que son el resultado de este uso, se consideran un residuo que plantea problemas para su eliminación. En consecuencia, la CBA puede ser reutilizable, si se utiliza como un agente estabilizador. (Torres Agredo et al., 2014)

También se encuentra entre este tipo de aditivos a la ceniza de cáscara de café (CCC), que se obtiene del desecho que queda al momento de retirar la pulpa o grano de café y que posterior a eso se procede a la trilla y la quema o incineración de la cáscara de café, en un horno a temperatura alta el cual nos da un producto llamado ceniza de cáscara de café (CCC) (Vargas et al., 2020), que puede ser aprovechado como material para la estabilización de suelos.

Asimismo, las cualidades puzolánicas de la ceniza de cáscara de arroz (RHA) fueron objeto de numerosas investigaciones en el siglo XX. Al interactuar químicamente con otros estabilizantes, se demostró que la CCA, rica en sílice amorfa, puede mejorar en gran medida las cualidades mecánicas de los suelos arcillosos, disminuyendo su expansividad y flexibilidad y aumentando su densidad y resistencia a la compresión (Pushpakumara & Mendis, 2022).

A pesar de los avances, una comprensión profunda de las capacidades, limitaciones y modos de acción de los muchos tipos de cenizas agroindustriales en una serie de suelos requiere la consolidación y síntesis de los datos dispersos en la literatura. Con el fin de preparar futuros

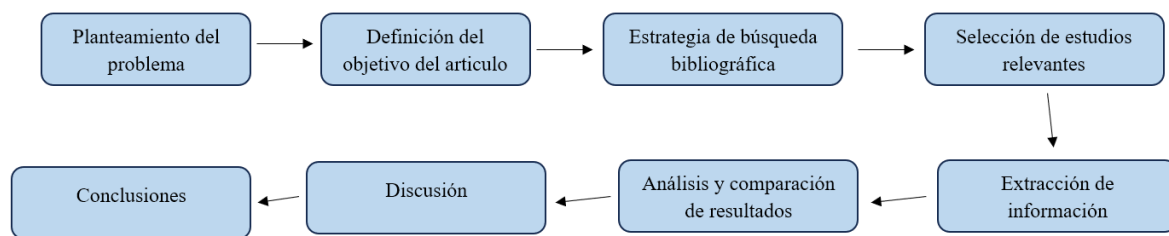
estudios, el presente artículo de revisión intenta realizar un análisis exhaustivo y crítico de la bibliografía existente sobre el uso de cenizas agroindustriales para la estabilización de suelos, centrándose principalmente en las cenizas de cáscara de arroz.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio utilizó un enfoque de investigación cualitativo-documental desde un punto de vista analítico, el objetivo principal es recopilar, evaluar y sintetizar la información sobre el uso de la ceniza de cáscara de arroz como agente estabilizador de suelos, para ello se realizó un diagrama de flujo que muestra el proceso general de cómo se llevó a cabo el presente estudio.

Figura 1

Diagrama de flujo general



Lo siguiente será comentar sobre los criterios de inclusión que se tuvieron presentes para la realización de este estudio, los artículos tienen que cumplir criterios estrictos para ser incluidos. Sólo se tuvieron en cuenta los trabajos escritos en inglés o español y publicados entre los años 2020 y 2025 que trataran sobre la adición de ceniza de cáscara de arroz a los suelos para estabilizarlos. Se dio prioridad a las investigaciones que utilizaron técnicas experimentales rigurosas, incluyendo ensayos de corte directo, California Bearing Ratio, resistencia a la compresión no confinada, compactación y análisis granulométrico en el laboratorio, así como investigaciones que además de la ceniza de cáscara de arroz también incluyeron la comparación de los resultados con los de otros estabilizantes convencionales como cal, cemento Portland, entre otros. Se excluyeron los trabajos que se centraban en tipos de suelos arenosos o en estabilizantes que no incluyeran la ceniza de cáscara de arroz, o que contenían datos no validados o cuyos métodos eran poco claros y confiables. Para la búsqueda de la información se utilizaron combinaciones de palabras clave en inglés y español, como rice husk ash, soil stabilization, clay soils, agroindustrial waste, ceniza de cáscara de arroz, estabilización de suelos, suelos arcillosos, desechos agroindustriales, para obtener una búsqueda decente en páginas de consulta académica, como lo son Scopus, Science Direct, Scielo, entre otros. Además, se

utilizaron operadores booleanos para mejorar la precisión de la búsqueda. Para el aprovechamiento de los datos se realizó un análisis de viabilidad y variación.

Tras examinar los títulos y resúmenes de diferentes documentos, se descartaron aquellos que no cumplían los procesos de selección. Una vez examinados todos los textos, se seleccionaron 20 fuentes que cumplían todos los requisitos metodológicos y pertinentes para esta evaluación y aportaban una contribución significativa al tema tratado. La matriz de comparación utilizada para analizar estas 20 publicaciones científicas incluía el país donde se realizó el estudio, el tipo de estudio, la metodología utilizada, los aditivos empleados, los laboratorios realizados y las conclusiones generales.

RESULTADOS

En esta sección del estudio se presentan los resultados obtenidos de la revisión de los trabajos seleccionados.

Se decidió organizar los datos en tablas según el país donde se realizó cada estudio, ordenando de manera descendente los países con la mayor cantidad de estudios recopilados. La evidencia seleccionada se concentró en dos países, India y Nigeria, que fueron los que reunieron el mayor número de investigaciones sobre estabilización de suelos con ceniza de cáscara de arroz (RHA) dentro de los criterios de inclusión definidos. Este enfoque permitió comparar los resultados con las normativas técnicas vigentes en cada país e identificar las características particulares del comportamiento de los suelos regionales estabilizados con RHA. De este modo, se pudo evaluar en qué medida los resultados cumplen los criterios mínimos de resistencia y rendimiento establecidos oficialmente.

Para cada uno de estos dos países se documentó el tipo de suelo examinado, el porcentaje de RHA empleado, las pruebas realizadas (Proctor, CBR, UCS, entre otras) y los resultados más pertinentes. Asimismo, se determinaron las normas aplicadas en cada caso, ya fueran reconocidas internacionalmente (ASTM, AASHTO, entre otras) o nacionales (por ejemplo, las normas IS en India o las guías NBRRI en Nigeria).

El análisis realizado examinó cómo los factores locales (el tipo de suelo, el clima y los métodos de construcción) y la normativa vigente en cada país influyeron en la viabilidad técnica de la estabilización mediante RHA. Además de identificar las prácticas más eficaces y las limitaciones observadas, esta revisión permitió formular recomendaciones orientadas a armonizar los criterios técnicos entre las normativas de los países analizados.

A continuación, se presenta la tabla con los estudios realizados en India (13 estudios):

Tabla 1
Estudios realizados en India

Título	Autor(es)	Año	Aditivos empleados	Ensayos realizados
Enhancing ₁ Soil ₁ Stability: ₁ Impact ₁ of RHA ₁ on Expansive ₁ Soil ₁ Behavior ₁	Nikita ₁ Raheja ₁ , Ashok ₁ Gupta ₁ y Kushal ₁ Kanwar ₁	2024	Ceniza ₁ de cáscara ₁ de arroz ₁ (RHA)	Límite de Atterberg, Índice de expansión libre, Compactación, Relación de soporte de California (CBR) y pruebas de compresión Triaxial no consolidadas no drenadas
Optimization ₁ of RHA ₁ and Cement ₁ Proportion ₁ for Soil ₁ Stabilization ₁	Ravi Shankar ₁ Raman, C Lavanya ₁ , V Revathi ₁ , Ginni Nijhawan ₁ , Dinesh Kumar ₁ Yadav ₁ , Q. Mohammad ₁ , y Vandana ₁ Arora Sethi ₁	2024	Cemento Ceniza de cáscara de arroz ₁ (RHA)	Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad
Stabilization ₁ of Clay ₁ Soil ₁ with Rice ₁ Husk ₁ Ash and Cement ₁	Vivek ₁ Kumar Chaturvedi ₁ y Dr. Navneet ₁ Himanshu ₁ .	2024	Cemento ₁ Ceniza de cáscara de arroz ₁ (RHA)	Prueba de compactación, Resistencia a la Compresión No Confinada (UCS) y Relación de Soporte de California (CBR) Pruebas de plasticidad,
Impact of RHA and Xanthan Gum in Road Works (Black Cotton Soil)	K.S Chamberlin, M. Rama Rao y K. Suresh.	2023	Cal ₁ Ceniza de cáscara de arroz ₁ (RHA)	Compactación, Hinchamiento y Relación de Soporte de California (CBR) Índice de hinchamiento libre (DFS), Compactación Proctor modificado, Límites de Atterberg, Resistencia a la compresión no confinada (UCS), Relación de soporte de California (CBR), Módulo resiliente
Sustainable ₁ Subgrade ₁ Improvement ₁ with Calcium ₁ Carbide ₁ Residue ₁ and RHA	Saba Anjum, Abhishek Sharma, Kennedy C. Onyelowe, Abdullah H. Alsabhan, Shamshad Alam, Kanwarpreet Singh, Aditya Kumar Tiwary, Sahil Sharma, Jibrán Qadri	2025	Carburo de calcio (CCR) Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	

Utilisation ₁ of Fly Ash ₁ and Rice ₁ Husk ₁ in Soil ₁ Stabilization ₁	Shwetha Prasanna	2022	Cenizas volantes Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	Límites de Atterberg, Compactación Proctor, Corte directo
Expansive ₁ Soil Stabilization ₁ using Geopolymer ₁ for Subgrade ₁ Applications ₁ Utilizing ₁ a Blend ₁ of Rice Husk ₁ Ash, Fly Ash, and Ground ₁ Granulated ₁ Blast Furnace ₁ Slag	Nimita Gautam, Abhijeet Nardey, y Padmanabh Gadge	2025	Silicato de sodio Cenizas volantes Cenizas de cáscara de arroz (RHA) Escoria de alto horno	límites de Atterberg, Contenido de humedad óptimo (OMC) y la Densidad seca máxima (MDD), Resistencia a la compresión no confinada (UCS)
Sustainable ₁ ground ₁ improvement ₁ of soft clay ₁ using ₁ eggshell ₁ lime and rice husk ₁ ash	Sheena Shaji, P.V. Divya	2024	Cal derivada de cáscara de huevo Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	Límites de Atterberg, Límite de contracción, Índice de hinchamiento libre, Proctor de compactación, Resistencia a compresión simple no confinada (UCS), Difracción de Rayos X (XRD), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) Distribución granulométrica
Chemically ₁ Stabilized ₁ Laterite ₁ Soil Using ₁ Rice Husk ₁ Ash	Somnath Paul y Dipankar Sarkar	2023	Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	Límites de Atterberg, Compactación Proctor modificado, CBR (California Bearing Ratio), Resistencia a compresión simple (UCS), Permeabilidad, Consolidación (edómetro)
Rice Husk ₁ Ash–Based Geopolymer ₁ Stabilization ₁ of Indian ₁ Peat: Experimental ₁ Investigation ₁	Suhail Ahmad Khanday, Monowar Hussain y Amit Kumar Das	2021	Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	Límites de Atterberg, Resistencia a la compresión no confinada (UCS), Microscopía electrónica de barrido (SEM), Análisis de difracción de rayos X (XRD)

Effect ₁ of Rice Husk ₁ Ash and Stone ₁ Dust on Selecting ₁ Engineering ₁ Properties ₁ of Poor Subgrade ₁ Soil	Ayush Mittal	2021	Ceniza de cáscara de arroz (RHA) Cemento Polvo de piedra	Límites de consistencia, Gravedad específica, Hinchamiento libre diferencial, Características de compactación, Valor de la Relación de Soporte de California (CBR) saturado Límites de Atterberg, Límite de contracción, Compactación (Proctor mini), Resistencia a la compresión simple, Difracción de Rayos X (XRD), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
Justification ₁ of strength ₁ properties ₁ of microstructural ₁ changes ₁ in the black ₁ cotton soil stabilized ₁ with rice husk ₁ ash and carbide ₁ lime in the presence ₁ of sodium ₁ salts	H. N. Ramesh, B. V. Manjunatha	2020	Ceniza de cáscara de arroz (RHA) Cal de carburo Sales de sodio	

Algo que resulta común en los 13 estudios realizados en India es que la incorporación de la ceniza de cáscara de arroz (RHA), reduce significativamente la plasticidad y el índice de expansión libre, en algunos casos de valores cercanos al 55%–70% hasta menos del 15%. También incrementa el CBR (California Bearing Ratio), en ocasiones más de siete veces respecto al suelo natural. Además mejora la resistencia a la compresión no confinada (UCS), alcanzando valores de hasta 189 kN/m² (cemento + RHA) y, en casos de mezclas con cal de carburo y sales de sodio, valores cercanos a 3000 kPa tras 90 días de curado. Incluso disminuye la permeabilidad, lo que aumenta la estabilidad frente a infiltraciones y ciclos de humedad-sequía. Por último se pudo observar que el desempeño óptimo suele encontrarse en rangos de 10%–20% de RHA combinada con 6%–10% de otro aglutinante (cemento, cal, CCR o polvo de piedra).

De acuerdo con la normativa nacional de carreteras de la India, en particular las especificaciones de la Indian Standard (IS:2720) para ensayos de suelo, y las guías del Indian Roads Congress (IRC 37-2018) para diseño de pavimentos, se requieren valores de CBR superiores al 5% para capas de subrasante en carreteras rurales y pavimentos flexibles. Los estudios analizados demuestran que, con la dosificación adecuada de RHA y aditivos complementarios, los valores de CBR obtenidos (entre 5% y 12%) cumplen o superan estos

mínimos establecidos por las normas indias. Por ejemplo, el trabajo de Anjum et al. (2025) alcanzó un CBR de 12.4% con 10% de CCR + 15% de RHA, muy por encima del requisito base.

En conclusión, la evidencia indica que el uso de RHA en India no solo es técnicamente viable, sino que además se alinea con las exigencias normativas locales, permitiendo el desarrollo de soluciones de bajo costo y sostenibles para la estabilización de suelos expansivos.

A continuación, se presenta la tabla con los estudios realizados en Nigeria (7 estudios):

Tabla 2

Estudios realizados en Nigeria

Título	Autor(es)	Año	Aditivos empleados	Ensayos realizados
Subgrade ₁ Stabilization ₁ Using RHA-Based Geopolymer ₁ and Cement ₁ Kiln ₁ Dust	Emmanuel Adeyanju, Chukwueloka Austin Okeke, Isaac Akinwumi, Ayobami Busari	2020	Polvo de horno de cemento (CKD) Ceniza de cáscara de arroz (RHA) Hidróxido de sodio (NaOH)	Límites de Atterberg, Compactación Proctor modificada, Índice de soporte de California (CBR), Resistencia a la compresión no confinada (UCS) Análisis granulométrico,
Influence ₁ of RHA on Engineering ₁ Properties ₁ of Soil	I. C. Onyechere, C. U. Anya, P. D. Onodagu, A. U. Onyechere, U. G. Eziefula, F. C. Njoku, L. Anyuogu	2024	Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	Límites de Atterberg, Gravedad específica, Prueba de compactación Proctor estándar, California Bearing Ratio (CBR)
Utilization ₁ of RHA in Soil ₁ Improvement ₁	Yahaya Ishaq Dikko Tariq Bala Mniauduga Auwal Shuaibu Uloko, Josiah Onu	2024	Ceniza de cáscara de arroz (RHA) Cemento Portland (OPC)	Límites de Atterberg (LL, PL, PI), gravedad específica, granulometría, Prueba Proctor estándar, CBR, UCS

Impact ₁ of Rice Husk ₁ Ash Based ₁ - Geopolymer ₁ on Some ₁ Geotechnical ₁ Properties ₁ of Selected ₁ Residual ₁ Tropical ₁ Soils ₁	A. L. Ayodele I. K. Ajibola A. B. Fajobi	2024	Hidróxido de sodio (NaOH) Meta silicato de sodio (Na ₂ SiO ₃) Ceniza de cáscara de arroz (RHA) Activador alcalino (RG)	Límites de Atterberg (LL, PL, PI), granulometría, pH, Prueba Proctor estándar, CBR, UCS, Difracción de rayos X, Fluorescencia, Microscopía electrónica
Effect ₁ of rice husk ₁ ash admixed ₁ with treated ₁ sisal ₁ fibre ₁ on properties ₁ of lateritic ₁ soil as a road construction ₁ material ₁	J.E. Sani, P. Yohanna, I.A. Chukwujama	2020	Ceniza de cáscara de arroz (RHA) Fibra de sisal	Contenido de humedad natural, límites de Atterberg, gravedad específica, clasificación AASHTO y USCS. Análisis por fluorescencia de rayos X (XRF), Ensayo Proctor modificado, Resistencia a la compresión no confinada (UCS), Resistencia a la tracción y elongación
Optimization ₁ of the California ₁ Bearing ₁ Ratio ₁ of Lateritic ₁ Soil Stabilized ₁ with Rice Husk ₁ Ash using Scheffe's ₁ Method ₁	Ike Ubadinanwa Elvis y Ike Charles Chinwuba	2023	Ceniza de cáscara de arroz (RHA) Agua	Contenido de humedad natural, Límites de Atterberg, Gravedad específica, Compactación Proctor y CBR

Microstructural investigation and strength properties of clay stabilized with cement, rice husk ash and promoter	Mustapha Mohammed Alhaji, Musa Alhassan, Taiye Waheed Adejumo, Ayuba Ibrahim Dogo	2020	Cemento Ceniza de cáscara de arroz (RHA) Promotor	Límites de Atterberg, Granulometría, Gravedad específica, Compactación Proctor, Resistencia a la compresión simple, Módulo de elasticidad, Difracción de Rayos X (XRD), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
--	---	------	---	--

Los resultados comunes que se encuentran en estos estudios al incorporar la ceniza de cáscara de arroz (RHA), es que reduce la plasticidad de los suelos y mejora su clasificación según AASHTO y SUCS. También se pudo observar que los valores de CBR aumentan significativamente en la mayoría de los estudios, pasando de valores muy bajos ($< 5\%$) en el suelo natural a rangos superiores al 10%–15% cuando se combina la RHA con cemento, activadores alcalinos o fibras. Por otro lado la resistencia a la compresión no confinada (UCS) también mejora, alcanzando en algunos casos más del doble de los valores originales. Se logra observar un efecto positivo adicional cuando la RHA se combina con fibra de sisal tratada, cenizas geos poliméricas o promotores químicos, logrando mejoras tanto en la resistencia como en la durabilidad.

En Nigeria, las especificaciones de diseño de carreteras están reguladas por la Federal Ministry of Works and Housing (FMWH) y las guías de la Nigerian Building and Road Research Institute (NBRRI). Estas establecen que los suelos destinados a subrasante deben presentar un $\text{CBR} \geq 5\%$ en condiciones remojadas y resistencias suficientes para soportar cargas de tráfico ligero y medio.

Los estudios analizados demuestran que la adición de RHA sola puede mejorar los suelos, pero en algunos casos los resultados apenas cumplen los mínimos normativos.

Por otro lado la adición de RHA combinada con cemento, CKD o activadores alcalinos produce un CBR entre 8% y 15%, valores que superan ampliamente los requeridos por FMWH y NBRRI.

En varios estudios, los valores de UCS también superan las recomendaciones de la norma BS 1924-2:2018, adoptada en Nigeria para estabilización de suelos con cal y cemento.

DISCUSIÓN

Según la revisión de investigaciones realizadas en India y Nigeria, la ceniza de cáscara de arroz (RHA) tiene un gran potencial para estabilizar suelos de baja capacidad portante, como los suelos lateríticos y expansivos. Parámetros críticos como el índice de plasticidad (PI), la capacidad de carga (CBR), la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y la durabilidad frente a los ciclos ambientales mejoraron significativamente en todos los contextos examinados con la adición de RHA, ya sea sola o en combinación con otros aditivos (como fibras, metacaolín, cemento, yeso, escoria y cal).

Sin embargo, los resultados también muestran variaciones en función del tipo de suelo y la dosis utilizada. El RHA por sí solo mostró aumentos modestos en India y Nigeria, pero cuando se combinó con cemento o cal, los valores de CBR superaron fácilmente los requisitos reglamentarios ($\geq 30\%$ para las subbases y $\geq 5\%$ para las subrasantes).

Una característica común a todas las investigaciones es que todas ellas respaldan la actividad puzolánica del RHA, que está relacionada con su alta concentración de sílice amorfa. La producción de geles cementantes se ha demostrado mediante investigaciones con SEM/XRD. Estos geles se encargan de compactar la microestructura, mejorar la resistencia y disminuir la plasticidad. De este modo, el RHA se está consolidando como un aditivo sostenible que puede reducir las emisiones de carbono, sustituir parcialmente a los materiales tradicionales y añadir valor a un residuo agrícola muy abundante en los países productores de arroz.

CONCLUSIONES

La evidencia recopilada permite concluir que la ceniza de cáscara de arroz (RHA) es un estabilizador viable, eficaz y sostenible para la mejora de suelos en ingeniería vial y geotécnica. Los principales hallazgos indican que:

- La RHA, en combinación con cal, cemento o escoria, alcanza valores de CBR y UCS que cumplen e incluso superan los requerimientos normativos establecidos por organismos internacionales (ASTM, AASHTO, BS) y nacionales en cada país analizado.
- La dosificación óptima suele situarse entre 5%–15% de RHA, dependiendo del tipo de suelo y del co-estabilizante empleado, siendo necesario evitar contenidos excesivos que reducen la resistencia.

- Los resultados fueron consistentes en los dos contextos geográficos analizados, India (Asia) y Nigeria (África), lo que sugiere un potencial prometedor de la técnica en distintas condiciones de suelo y clima. No obstante, dado que la evidencia revisada proviene únicamente de estos dos países, se recomienda ampliar la investigación a otras regiones antes de generalizar su aplicabilidad.
- La RHA contribuye no solo al cumplimiento normativo, sino también a la sostenibilidad ambiental, al reutilizar un residuo agrícola problemático y reducir el consumo de materiales de mayor impacto ambiental como el cemento.
- En países con normativas más exigentes, la RHA puede no alcanzar los valores requeridos para capas de base de alto tránsito, pero sí resulta aplicable en subbases y vías de bajo volumen, consolidándose como una alternativa técnica y ambientalmente responsable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bravo, B. y Lopez, H. (2021). Mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos empleando valvas de molusco y vidrio en la ciudad de Talara, Piura.
- Pushpakumara, B. y Mendis, W. (2022). Suitability of rice husk ash (RHA) with lime as a soil stabilizer in geotechnical applications. *International Journal of Geo-Engineering*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00169-w>
- Vargas, Y., Gutierrez, Y. y Rojas, J. (2020). Estabilización de afirmado con ceniza proveniente de desechos de cascarilla de café para aplicar en suelos de contracción de vías. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1).
- Torres, J., de Gutiérrez, R. y Gonzales, L. (2014). Characterization of sugar cane bagasse ash as supplementary material for Portland cement. *Ingeniería e Investigación*, 34(1).
- Rahaja, N., Gupta, A., & Kanwar, K. (2024). Enhancing Soil Stability: The Impact of RHA on Expansive Soil Behavior. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459601011>
- Raman, R. S., Lavanya, C., Revathi, V., Nijhawan, G., Yadav, D. K., Mohammad, Q., & Arora Sethi, V. (2024). Optimization of RHA and Cement Proportion for Soil Stabilization. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452901015>
- Chaturvedi, V. K., & Himanshu, N. (2024). Stabilization of Clay Soil with Rice Husk Ash and Cement. <https://doi.org/10.53555/AJBR.v27i4S.3704>

- Adeyanju, E., Okeke, C. A., Akinwumi, I., & Busari, A. (2020). Subgrade Stabilization Using RHA-Based Geopolymer and Cement Kiln Dust. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00388>
- Chamberlin, K. S., Rao, M. R., & Suresh, K. (2023). Impact of RHA and Xanthan Gum in Road Works (Black Cotton Soil). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101004>
- Onyechere, I., Anya, C., Onodagu, P., Onyechere, A., Eziefula, U., Njoku, F., & Anyaogu, L. (2025). Influence of Rice Husk Ash on the Engineering Properties of Soil . NIPES - Journal of Science and Technology Research, 7(2), 253–262. <https://doi.org/10.37933/nipes/7.2.2025.17>
- Dikko, Y. I., Mniauduga, T. B., Shuaibu, A., & Onu, J. (2024). Utilization of RHA in Soil Improvement. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14578755>
- Ayodele, A. L., Ajibola, I. K., & Fajobi, A. B. (2024). Impact of Rice Husk Ash Based-Geopolymer on Some Geotechnical Properties of Selected Residual Tropical Soils. <https://doi.org/10.63746/njtd.v21i2.2417>
- Anjum, S., Sharma, A., Onyelowe, K. C., Alsabhan, A. H., Alam, S., Singh, K., Tiwary, A. K., Sharma, S., & Qadri, J. (2025). Sustainable Subgrade Improvement with Calcium Carbide Residue and RHA. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98833-z>
- Sani, J. E., Yohanna, P., & Chukwujama, I. A. (2020). Effect of rice husk ash admixed with treated sisal fibre on properties of lateritic soil as a road construction material. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.11.001>
- Elvis, I. U., & Chinwuba, I. C. (2023). Optimization of the California Bearing Ratio of Lateritic Soil Stabilized with Rice Husk Ash using Scheffe's Method. [http://dx.doi.org/10.17576/jkukm-2023-35\(3\)-19](http://dx.doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(3)-19)
- Mittal, A. (2021). Effect of Rice Husk Ash and Stone Dust on Selecting Engineering Properties of Poor Subgrade Soil. Recuperado de: <https://jjce.just.edu.jo/Download.ashx?f=Yq%2FDs4fZWIPciA2yV%2FUKx9Pe2BMqEifzz9cH3MPwiRU%3D>
- Alhaji, M. M., Alhassan, M., Adejumo, T. W., & Dogo, A. I. (2020). Microstructural investigation and strength properties of clay stabilized with cement, rice husk ash and promoter. <https://doi.org/10.11113/jt.v82.14353>

- Ramesh, H.N., Manjunatha, B.V. Justification of strength properties of microstructural changes in the black cotton soil stabilized with rice husk ash and carbide lime in the presence of sodium salts. *SN Appl. Sci.* 2, 457 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2226-1>
- Wibowo, D. E., Ramadhan, D. A., Endaryanta, & Prayuda, H. (2023). Soil stabilization using rice husk ash and cement for pavement subgrade materials. *Revista de la Construcción*, 22(1), 192. <https://doi.org/10.7764/RDLC.22.1.192>
- Centeno-Demera, C. J., Saltos-Hidalgo, F. A., & Ortiz-Hernández, E. (2024). Estabilización de suelos arcillosos con el empleo de las cenizas de cáscara de arroz combinada con cal. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 7(14), 101-113. <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0206>
- Almuaythir, S., Zaini, M. S. I., Hasan, M., & Hoque, M. I. (2024). Sustainable soil stabilization using industrial waste ash: Enhancing expansive clay properties. *Heliyon*, 10(20), e39124. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39124>
- Zaika, Y., & Suryo, E. A. (2020). The durability of lime and rice husk ash improved expansive soil. *International Journal of GEOMATE*, 18(65), 171-178. <https://doi.org/10.21660/2020.65.5539>
- Abbasi, M., Hosseinpour, I., Salimi, M., Astaneh, A. G., & Payan, M. (2025). A comparative study on stabilization efficiency of kaolinite and montmorillonite clays with fly ash (FA) and rice husk ash (RHA)-based geopolymers. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 2332-2347. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.234>
- Li, B., Luo, F., Li, X., & Liu, J. (2024). Mechanical properties evolution of clays treated with rice husk ash subjected to freezing-thawing cycles. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02712. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02712>
- Baldin, C. R. B., Kawanami, M. Y., Costa, W. G. S., Bordignon, V. R., da Luz, C. C., & Izzo, R. L. S. (2023). Mechanical properties of a clay soil reinforced with rice husk under drained and undrained conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(10), 2676-2686. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.02.022>
- Jamil, M. A.-B., Hayano, K., Mochizuki, Y., & Li, C. (2024). Consolidation characteristics of compacted clayey soils treated with various biomass ashes. *Results in Engineering*, 24, 103480. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103480>

- Zivari, A., Siavoshnia, M., & Rezaei, H. (2023). Effect of lime–rice husk ash on geotechnical properties of loess soil in Golestan province, Iran. *International Journal of Geo-Engineering*, 14, Artículo 20. <https://doi.org/10.1186/s40703-023-00200-7>
- Moazami, A., Nabizadeh, M., Komaei, A., & Soroush, A. (2025). Sustainable soil stabilization with sodium carbonate-activated slag, pumice, rice husk, and sugarcane bagasse ashes: A life cycle assessment approach. *Results in Engineering*, 25, 106900. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106900>
- Syahril, S., Sagala, S. D., Purba, D. A., & Syahputra, K. H. (2025). Sustainable soft clay stabilization using rice husk ash and waste spent catalyst from residual catalytic cracking. *International Journal of GEOMATE*, 29(131), 48-55. <https://doi.org/10.21660/2025.131.4842>
- Nimita Gautam, Abhijeet Nardey, Padmanabh Gadge, "Expansive Soil Stabilization using Geopolymer for Subgrade Applications Utilizing a Blend of Rice Husk Ash, Fly Ash, and Ground Granulated Blast Furnace Slag," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 93-101, 2025. Crossref, <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V12I3P109>
- Ike, U. E., & Ike, C. C. (2023). Optimization of the California Bearing Ratio of Lateritic Soil Stabilized with Rice Husk Ash using Scheffe's Method. *Jurnal Kejuruteraan*, 35(3), 705-715. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35\(3\)-19](https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(3)-19)
- Bournebe Baimourne, Richard Ocharo Onchiri, Joseph Ng'ang'a Thuo, "Investigation on the Suitability of High Clay Lateritic Soils Stabilized with Cement and Rice Husk Ash for Use in Road Base Construction: A Case Study of Juja Town," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 71, no. 2, pp. 121-128, 2023. Crossref, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I2P215>