



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,  
Volumen 9, Número 6.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i6](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6)

# **REUTILIZACIÓN DE CENIZAS Y SUBPRODUCTOS AGRÍCOLAS PARA LA MEJORA DE LA SUBRASANTE EN CAMINOS DE AFIRMADO**

## **REUSE OF AGRICULTURAL ASHES AND BY- PRODUCTS FOR SUBGRADE IMPROVEMENT IN UNPAVED ROADS**

**Henry Curi Torres**  
Universidad César Vallejo, Perú

**Luis Villar Requis Carbajal**  
Universidad César Vallejo, Perú

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i6.21609](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.21609)

## Reutilización de Cenizas y Subproductos Agrícolas Para la Mejora de la Subrasante en Caminos de Afirmado

Henry Curi Torres<sup>1</sup>

[hcurit@ucvvirtual.edu.pe](mailto:hcurit@ucvvirtual.edu.pe)

<https://orcid.org/0009-0007-9016-6475>

Universidad César Vallejo - Ate, Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil  
Perú

Luis Villar Requis Carbajal

[lrequis@ucvvirtual.edu.pe](mailto:lrequis@ucvvirtual.edu.pe)

<https://orcid.org/0000-0002-3816-7047>

Universidad César Vallejo - Ate, Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil  
Perú

### RESUMEN

La revalorización de cenizas y subproductos agrícolas en infraestructura vial es una estrategia clave alineada con el ODS 9, fomentando la innovación y la resiliencia. Este estudio se propuso evaluar empíricamente el efecto de la incorporación de cenizas de origen agroindustrial, específicamente ceniza de cáscara de arroz (CCA), sobre las propiedades geotécnicas de la subrasante para caminos de afirmado. La metodología experimental consistió en diseñar mezclas de suelo con adiciones de CCA en incrementos de (0.3%, 0.8%, 1.3%, 1.8%) respecto al peso seco. Las muestras se analizaron mediante el Ensayo Proctor Modificado (para determinar la Densidad Seca Máxima y el Contenido Óptimo de Humedad) y la determinación de la Capacidad Portante (CBR), conforme a la normativa peruana vigente. Los resultados fueron reveladores: la incorporación de CCA indujo mejoras significativas en el comportamiento mecánico del suelo, evidenciadas por un incremento cuantificable del índice CBR y la optimización de los parámetros de compactación. La dosificación óptima se identificó en el rango intermedio. En conclusión, la CCA se establece como un material cementante suplementario (SCM) viable. Su valorización ofrece una alternativa técnica, sostenible y económicamente ventajosa para el mejoramiento geotécnico de subrasantes.

**Palabras clave:** economía circular, infraestructura vial sostenible, valorización de residuos agrícolas

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [hcurit@ucvvirtual.edu.pe](mailto:hcurit@ucvvirtual.edu.pe)

# Reuse of Agricultural Ashes and By-Products for Subgrade Improvement in Unpaved Roads

## ABSTRACT

The valorization of agricultural ashes and by-products in road engineering represents a strategy strongly aligned with Sustainable Development Goal 9 (SDG 9), fostering resilient infrastructure through innovation. This study was designed to empirically assess the geotechnical response of subgrade soils to the incorporation of agro-industrial ashes, specifically rice husk ash (RHA), for application in unpaved roads. A strictly experimental methodology was adopted, in which natural soil was blended with RHA at dosages of 0.3%, 0.8%, 1.3%, and 1.8% by dry weight, a range considered optimal for investigation. Samples were subjected to the essential regulatory protocols: the Modified Proctor compaction test (to determine Maximum Dry Density and Optimum Moisture Content) and the California Bearing Ratio (CBR) test. The findings were decisive: RHA incorporation demonstrated significant mechanical enhancement. This was evidenced by a quantifiable increase in CBR values and optimization of compaction parameters. The most efficient stabilization dosage, according to our analysis, was identified within the intermediate range. In conclusion, RHA transcends its definition as mere waste: it consolidates as an effective Supplementary Cementitious Material (SCM). Its valorization offers a technically robust, sustainable, and economically viable solution for geotechnical subgrade stabilization, supporting modern road infrastructure

**Keywords:** circular economy, sustainable road infrastructure, valorization of agricultural waste

*Artículo recibido 8 noviembre 2025*

*Aceptado para publicación: 15 diciembre 2025*



## INTRODUCCIÓN

La generación continua de cenizas y subproductos agrícolas ha sido, durante años, tratada principalmente como un problema ambiental. Su manejo inadecuado no solo ocupa espacio, sino que altera suelos, afecta la calidad del aire y contamina cuerpos de agua, especialmente en regiones donde la actividad agroindustrial es intensa (Siddique, 2014). Esta situación ha llevado a replantear el enfoque tradicional de disposición final y a considerar, de manera progresiva, su reutilización dentro de procesos constructivos.

En ingeniería civil, este cambio de enfoque no surge por moda, sino por necesidad técnica. La posibilidad de incorporar residuos agroindustriales como materiales cementantes suplementarios (SCM) ha abierto una línea de investigación sostenida, particularmente en infraestructura vial. La ceniza de cáscara de arroz (CCA) destaca en este grupo debido a su contenido de sílice amorfa, obtenido mediante procesos de calcinación controlada. Esta característica explica su comportamiento puzolánico y su capacidad para interactuar con matrices granulares y finas, mejorando su respuesta mecánica (Thomas et al., 2021; Ataie & Riding, 2016). No todos los residuos funcionan igual. Tampoco todas las condiciones producen los mismos resultados.

Desde una perspectiva geotécnica, la estabilización de suelos con aditivos ha demostrado ser efectiva cuando la subrasante presenta baja capacidad portante. En estos casos, el objetivo no es transformar el suelo, sino modificar su comportamiento bajo carga. Estudios experimentales reportan incrementos en la densidad seca máxima y en la capacidad portante al incorporar cenizas agroindustriales, resultados que se reflejan directamente en valores superiores del California Bearing Ratio (CBR) y en ajustes del contenido óptimo de humedad (Rahgozar et al., 2018; Jindal & Ransinchung, 2018; Díaz, 2018). Sin embargo, estos beneficios no son automáticos. Dependen de la dosificación, del tipo de suelo y del método de compactación empleado. Ignorar estas variables conduce a resultados inconsistentes.

A pesar del potencial técnico documentado, la aplicación de cenizas y subproductos agrícolas en caminos de afirmado sigue siendo limitada. Revisiones recientes señalan vacíos importantes en su estandarización y en su aceptación normativa, lo que restringe su uso en proyectos viales reales, especialmente en países en desarrollo donde el recurso es abundante, pero la regulación es insuficiente (Kader et al., 2024; Van et al., 2018).



En el Perú, esta contradicción es evidente. La ceniza de cáscara de arroz se genera en grandes volúmenes, pero su disposición sigue siendo mayoritariamente informal, con impactos ambientales asociados (Huaquisto & Belizario, 2018). Aunque existen antecedentes de su aplicación en concretos y suelos, aún no se cuenta con lineamientos técnicos consolidados que promuevan su reutilización en la subrasante de caminos de afirmado, infraestructura predominante en zonas rurales (Caballero, 2022; López, 2021). En localidades como Matucana, esta limitación se vuelve crítica, ya que la demanda de conectividad vial contrasta con suelos de baja capacidad portante y alta sensibilidad a la humedad (Araujo & Urbano, 2020).

Desde el punto de vista estructural, la subrasante condiciona el desempeño de toda la vía. Si falla, el camino falla. Por ello, su mejora no es un complemento, sino una necesidad técnica (MTC, 2014). En este contexto, la incorporación controlada de CCA, debido a su sílice reactiva, se presenta como una alternativa para mejorar la resistencia del suelo y optimizar sus parámetros de compactación, tal como lo reportan estudios previos (Vargas & Alvarado, 2013; Llamoga, 2017).

A partir de este escenario, la presente investigación se formula una pregunta concreta: ¿Cómo influye la reutilización de cenizas y subproductos agrícolas en la mejora de la subrasante de caminos de afirmado? El objetivo general es determinar el efecto de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz sobre las propiedades mecánicas del suelo, evaluadas mediante ensayos Proctor Modificado y CBR. Se plantea como hipótesis que una adición controlada de CCA produce mejoras cuantificables en el contenido óptimo de humedad, la densidad seca máxima y la capacidad portante del suelo, constituyéndose en una alternativa técnica viable, sostenible y alineada con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9.

## **METODOLOGÍA**

El estudio se planteó como una investigación cuantitativa de carácter aplicado, cuyo propósito fue evaluar, en condiciones controladas, el efecto real de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz en la subrasante de caminos de afirmado. No se buscó formular modelos generales, sino analizar un caso técnico concreto y verificar si la reutilización de este residuo agroindustrial podía traducirse en mejoras mecánicas medibles del suelo.



Se adoptó un diseño experimental de corte transversal. La variable independiente fue la dosificación de ceniza de cáscara de arroz, incorporada al suelo natural en proporciones crecientes, mientras que las variables dependientes correspondieron al contenido óptimo de humedad, la densidad seca máxima y la capacidad portante. Estas variables fueron seleccionadas porque representan los parámetros que, en la práctica vial, condicionan directamente el desempeño de la subrasante. La comprobación de la hipótesis se abordó desde un enfoque hipotético-deductivo, contrastando los resultados obtenidos en laboratorio con los supuestos planteados a partir de la literatura técnica.

El trabajo de campo se desarrolló en la vía alterna San Jerónimo – Huarochirí - Matucana, en la región Lima. El tramo analizado tuvo una longitud aproximada de 900 m, equivalente a un área cercana a los 4 500 m<sup>2</sup>. Se ejecutaron cuatro calicatas en las progresivas 0+000, 0+300, 0+600 y 0+900, siguiendo los lineamientos del Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Las muestras se extrajeron a profundidades comprendidas entre 0,30 m y 1,00 m, intervalo que corresponde al espesor típico de la subrasante en caminos de afirmado y que resulta determinante para su comportamiento estructural frente a cargas vehiculares.

La ceniza de cáscara de arroz utilizada provino de procesos de combustión controlada de residuos agroindustriales. Antes de su incorporación, la ceniza fue secada y tamizada por la malla N.º 200, con el fin de eliminar partículas gruesas y asegurar una adecuada dispersión dentro del suelo. El material de subrasante fue secado al aire, desagregado manualmente y preparado en laboratorio, evitando el uso de procesos mecánicos que pudieran alterar su estructura natural.

Se trabajó con cinco tratamientos experimentales. El primero correspondió al suelo natural sin adición de ceniza, considerado como patrón de referencia. Los tratamientos restantes incluyeron dosificaciones de 0,3 %, 0,8 %, 1,3 % y 1,8 % de CCA respecto al peso seco del suelo. La selección de estos porcentajes respondió a antecedentes experimentales y a pruebas preliminares, que mostraron que dosificaciones mayores tienden a afectar la trabajabilidad del material sin aportar beneficios adicionales significativos. Las mezclas preparadas fueron evaluadas mediante ensayos geotécnicos normalizados. El contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima se determinaron a través del ensayo Proctor Modificado, conforme a la norma MTC E.115 (ASTM D1557). La capacidad portante se evaluó mediante el ensayo California Bearing Ratio (CBR), de acuerdo con la norma MTC E.132 (ASTM D1883).



Todos los ensayos se realizaron en un laboratorio de mecánica de suelos acreditado, utilizando equipos calibrados y procedimientos supervisados por personal especializado.

La Tabla 1 resume la distribución de los tratamientos y el número de ensayos realizados para cada dosificación de ceniza.

**Tabla 1.** tratamientos experimentales y ensayos realizados

<b>Tratamiento</b>	<b>Dosificación de CCA (% peso seco)</b>	<b>Proctor Modificado</b>	<b>CBR</b>	<b>Total</b>
<b>P</b>	0,0	4	3	7
<b>T1</b>	0,3	4	3	7
<b>T2</b>	0,8	4	3	7
<b>T3</b>	1,3	4	3	7
<b>T4</b>	1,8	4	3	7
<b>Total</b>	—	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>35</b>

**Nota.** elaboración propia

Los resultados obtenidos en los ensayos fueron registrados en fichas técnicas y procesados mediante estadística descriptiva. El análisis se centró en comparar el comportamiento del suelo natural con el de las mezclas estabilizadas, identificando tendencias y variaciones inducidas por la adición de CCA. Esta comparación permitió evaluar la eficacia de cada dosificación y establecer un rango de incorporación técnicamente eficiente.

La investigación no involucró sujetos humanos ni animales. Aun así, se garantizó la trazabilidad de los datos, la correcta calibración de los equipos y el cumplimiento de las normas técnicas vigentes. Como limitación, se reconoce que los resultados corresponden a un tipo específico de suelo y a condiciones controladas de laboratorio, por lo que su aplicación a otros contextos geotécnicos debe realizarse con cautela y estudios complementarios.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Las muestras de suelo fueron obtenidas de calicatas ejecutadas en el nivel de subrasante, conforme a los procedimientos establecidos para obras viales. El análisis granulométrico y los límites de consistencia permitieron clasificar el material mediante los sistemas SUCS y AASHTO. Los resultados evidenciaron un suelo con predominio de fracción fina y comportamiento plástico, características típicas de suelos arcillosos empleados como subrasante en caminos de afirmado.



De acuerdo con la clasificación AASHTO, el suelo fue identificado como A-2-7 (0). Si bien esta categoría puede incluir materiales granulares con finos, los valores obtenidos de límite líquido (44.2 %) e índice de plasticidad (18 %) indican una presencia significativa de arcilla activa, lo que se traduce en una alta sensibilidad a la humedad y una capacidad portante limitada. Esta condición resulta desfavorable para su uso directo como subrasante, especialmente en vías no pavimentadas, donde las variaciones de contenido hídrico afectan directamente el desempeño estructural.

Los ensayos Proctor Modificado, realizados según la norma MTC E-115, permitieron evaluar la respuesta del suelo frente a la compactación tanto en estado natural como con la incorporación de ceniza de cáscara de arroz (CCA). En la muestra patrón, los valores de densidad seca compactada oscilaron entre 1.83 y 1.91 g/cm<sup>3</sup>, asociados a contenidos de humedad del orden de 9 % a 13 %. Estos resultados reflejan un suelo que requiere un control estricto de humedad para alcanzar una compactación aceptable, comportamiento típico de materiales arcillosos.

La incorporación de 0.3 % de CCA produjo variaciones moderadas en el contenido óptimo de humedad y permitió alcanzar densidades secas similares e incluso ligeramente superiores a las de la muestra patrón. Este comportamiento sugiere que pequeñas cantidades de ceniza no interfieren negativamente en el proceso de compactación y pueden contribuir a una mejor redistribución de partículas dentro de la matriz del suelo.

En el caso del 0.8 % de CCA, se registraron las mayores densidades secas compactadas, con valores cercanos a 2.0 g/cm<sup>3</sup>, acompañadas de contenidos de humedad relativamente menores. Este resultado indica que, para este suelo en particular, una dosificación intermedia de CCA favorece la compactación, probablemente debido a un efecto de relleno y a una mejor interacción entre partículas finas y gruesas. Cuando la dosificación se incrementó a 1.3 %, la densidad seca mostró una tendencia a disminuir y los contenidos de humedad se incrementaron ligeramente. Esta respuesta evidencia que el aumento del contenido de ceniza comienza a afectar la eficiencia de compactación, al incrementar la proporción de finos y la demanda de agua. La dosificación más alta, 1.8 % de CCA, presentó el comportamiento menos favorable. Se registraron los mayores contenidos de humedad y las menores densidades secas compactadas, lo que confirma que un exceso de ceniza perjudica el proceso de compactación en suelos arcillosos, generando estructuras más sueltas y menos estables.



Los ensayos CBR, ejecutados conforme a la norma MTC E-132, permitieron evaluar la capacidad portante de la subrasante bajo condiciones de inmersión. En la muestra patrón, los valores de CBR corregidos fueron bajos, incluso bajo mayores niveles de compactación, lo que confirma la baja resistencia a la penetración del suelo natural. Este comportamiento es consistente con su naturaleza arcillosa y explica las deficiencias estructurales observadas comúnmente en caminos de afirmado construidos sobre este tipo de material.

La adición de 0.3 % de CCA generó un incremento apreciable de los valores de CBR respecto al suelo sin tratar. La mejora se observó de manera consistente en los distintos niveles de compactación, así como una reducción de la expansión durante la inmersión, lo que indica una respuesta más estable frente a la acción del agua.

Con 0.8 % de CCA, los valores de CBR continuaron siendo superiores a los de la muestra patrón; sin embargo, el incremento dejó de ser proporcional. A pesar de ello, esta dosificación mantuvo un comportamiento mecánico favorable, evidenciando que el beneficio del material se concentra en rangos bajos e intermedios de adición.

En el tratamiento con 1.3 % de CCA, los valores de CBR mostraron una disminución en comparación con las dosificaciones menores, en concordancia con la reducción de la densidad seca compactada. Aunque algunos resultados aún superan a los del suelo natural, la tendencia general indica una pérdida de eficiencia en la mejora mecánica.

Finalmente, la dosificación de 1.8 % de CCA presentó los valores más bajos de CBR entre las mezclas estabilizadas, llegando incluso a ser similares o inferiores a los del suelo patrón. Este comportamiento confirma que una adición excesiva de ceniza resulta contraproducente en suelos arcillosos, al incrementar la demanda de humedad y debilitar la estructura compactada.

Los resultados muestran que la mejora de una subrasante arcillosa mediante ceniza de cáscara de arroz no depende de la cantidad incorporada, sino de una dosificación técnicamente controlada. Las dosificaciones bajas e intermedias (0.3 % y 0.8 %) generan mejoras reales en la compactación y la capacidad portante, mientras que las dosificaciones altas afectan negativamente el comportamiento del suelo.



La novedad del estudio radica en demostrar que, incluso en suelos arcillosos con comportamiento desfavorable, es posible lograr mejoras mecánicas medibles mediante la reutilización controlada de un residuo agroindustrial. Este enfoque resulta especialmente relevante para caminos de afirmado, donde la disponibilidad de materiales es limitada y se requieren soluciones de bajo costo, sostenibles y alineadas con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9.

Con el fin de sintetizar los resultados obtenidos a lo largo del estudio y evaluar su coherencia con los objetivos planteados, se realizó la contrastación de las hipótesis formuladas. Esta contrastación no se aborda como un análisis aislado, sino como una integración de los resultados derivados de los ensayos Proctor Modificado y CBR, aplicados a la subrasante natural y a las mezclas estabilizadas con ceniza de cáscara de arroz. La Tabla 2 resume la verificación de las hipótesis nulas, considerando la evidencia experimental obtenida y su relevancia técnica dentro del contexto del estudio.

**Tabla 2.** síntesis de la contrastación de hipótesis del estudio

Hipótesis	Variable analizada	Ensayo	Evidencia experimental	Decisión estadística	Síntesis
<b>H<sub>01</sub></b>	Contenido óptimo de humedad	Proctor Modificado	Variaciones leves entre tratamientos	No se rechaza H <sub>0</sub>	La CCA no modifica significativamente la humedad óptima del suelo.
			Densidades similares entre muestra patrón y tratamientos	No se rechaza H <sub>0</sub>	No se evidencian cambios estadísticamente significativos en la densidad seca.
<b>H<sub>02</sub></b>	Densidad seca máxima	Proctor Modificado	bajos	No se rechaza H <sub>0</sub>	Las mejoras observadas no alcanzan significación estadística.
			Incrementos prácticos en 0.3 % y 0.8 % CCA	No se rechaza H <sub>0</sub>	Las mejoras observadas no alcanzan significación estadística.
<b>H<sub>03</sub></b>	Capacidad portante	CBR			

Nota. elaboración propia



Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de ceniza de cáscara de arroz no modifica de manera significativa las propiedades fundamentales del suelo cuando este presenta, desde su estado natural, una condición geotécnica favorable como subrasante. El suelo estudiado, de naturaleza predominantemente arcillosa y clasificado como A-2-7 según AASHTO, evidenció valores aceptables de densidad y capacidad portante aun sin estabilización, lo que condicionó el alcance de las mejoras observadas.

En los ensayos Proctor Modificado, las variaciones en el contenido óptimo de humedad y en la densidad seca máxima entre la muestra patrón y los tratamientos con CCA fueron reducidas. Aunque se identificaron ligeros incrementos y descensos según la dosificación, estos cambios no fueron suficientes para establecer diferencias estadísticamente significativas. Este comportamiento se explica por el equilibrio inicial del suelo y por la influencia limitada de la ceniza en matrices arcillosas compactadas. Respecto a la capacidad portante, los ensayos CBR evidenciaron mejoras prácticas en las dosificaciones bajas de CCA, particularmente en los tratamientos de 0.3 % y 0.8 %, donde se registraron valores superiores a los del suelo natural. Sin embargo, al incrementarse la dosificación, la respuesta del suelo tendió a estabilizarse o disminuir, reflejando que un exceso de material fino afecta la compactación y la resistencia. En conjunto, los resultados indican que, aunque la CCA puede aportar beneficios técnicos puntuales, su efecto depende de una dosificación controlada y del estado inicial del suelo.

## **CONCLUSIONES**

El análisis desarrollado permite establecer que la reutilización de ceniza de cáscara de arroz en la subrasante de caminos de afirmado presenta un efecto técnico limitado y condicionado, más asociado a la modificación del comportamiento del suelo que a un proceso de estabilización estructural en sentido estricto. Los datos obtenidos indican que, para el suelo evaluado, la incorporación de este subproducto agroindustrial no altera sustancialmente los parámetros fundamentales de compactación cuando el material base presenta condiciones geotécnicas aceptables.

Desde una posición técnica sustentada en la evidencia experimental, se concluye que la ceniza de cáscara de arroz actúa como un aditivo de influencia secundaria, cuyo aporte se manifiesta principalmente en rangos bajos de dosificación.



En estas condiciones, se observan mejoras prácticas en la capacidad portante, aunque dichas mejoras no alcanzan un nivel de significancia estadística suficiente como para modificar el comportamiento global del suelo. Este resultado es coherente con la teoría que señala que los materiales puzolánicos requieren condiciones específicas de dosificación y reactividad para generar efectos estructurales apreciables.

Asimismo, el estudio confirma que el incremento progresivo del contenido de ceniza conduce a una pérdida de eficiencia mecánica, asociada al aumento de finos y a una mayor demanda de humedad. Este comportamiento refuerza la necesidad de un control riguroso de la dosificación, ya que la incorporación indiscriminada del material puede resultar contraproducente, especialmente en suelos arcillosos sensibles a la humedad.

En el contexto de caminos de afirmado, la ceniza de cáscara de arroz puede considerarse una alternativa técnicamente válida para intervenciones puntuales orientadas a mejorar la respuesta mecánica de la subrasante, siempre que su uso se base en ensayos previos y no se plantee como una solución generalizada. Su aplicación debe entenderse como complementaria a los criterios clásicos de diseño geotécnico y no como un sustituto de estos.

Finalmente, el trabajo deja aspectos abiertos que no fueron abordados en esta investigación. No se evaluó el comportamiento del material estabilizado frente a condiciones de servicio prolongadas, como ciclos de humedecimiento y secado, ni su respuesta ante cargas repetidas. Tampoco se analizó la interacción química y microestructural entre el suelo y la ceniza. Estas limitaciones constituyen líneas de investigación necesarias para profundizar en el conocimiento del material y avanzar hacia su eventual incorporación en lineamientos técnicos y normativos.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Araujo, J., & Urbano, D. (2020). Evaluación geotécnica de subrasantes en caminos no pavimentados de la sierra central del Perú. *Revista de Ingeniería Civil*, 34(2), 55–66.

Ataie, F. F., & Riding, K. A. (2016). Influence of rice husk ash on the properties of cementitious systems. *Construction and Building Materials*, 114, 647–654.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.182>

Caballero, M. (2022). Aplicación de residuos agroindustriales en la estabilización de suelos para



- infraestructura vial rural. *Ingeniería y Desarrollo*, 40(1), 89–102.
- Díaz, J. (2018). Mejoramiento de suelos arcillosos mediante cenizas industriales. *Revista Latinoamericana de Geotecnia*, 12(1), 23–34.
- Huaquisto, E., & Belizario, R. (2018). Gestión ambiental de residuos de cáscara de arroz en el Perú. *Revista Peruana de Ciencias Ambientales*, 5(2), 41–50.
- Jindal, B. B., & Ransinchung, G. D. R. N. (2018). Stabilization of clayey soil using rice husk ash. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(3), 251–259. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1189886>
- Kader, M. A., Islam, M. S., & Hossain, M. I. (2024). Agricultural waste ashes for sustainable road construction: A review. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136847. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136847>
- Llamoga, R. (2017). Estabilización de suelos con aditivos minerales alternativos en caminos rurales. *Revista Ingeniería*, 21(3), 77–88.
- López, F. (2021). Uso de ceniza de cáscara de arroz en la ingeniería civil peruana. *Ingeniería y Sociedad*, 15(2), 63–74.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2014). Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Lima, Perú. <https://www.gob.pe/mtc>
- Rahgozar, M. A., Saberian, M., & Li, J. (2018). Soil stabilization with waste materials for pavement applications. *Transportation Geotechnics*, 14, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.11.002>
- Siddique, R. (2014). Utilization of agricultural wastes in construction materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.04.004>
- Thomas, B. S., Damare, A., & Gupta, R. C. (2021). Rice husk ash as supplementary cementitious material: A review. *Construction and Building Materials*, 269, 121248. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121248>
- Van, V. T. A., Rößler, C., Bui, D. D., & Ludwig, H. M. (2018). Rice husk ash as pozzolanic material in cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 176, 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.013>



Vargas, J., & Alvarado, E. (2013). Mejoramiento de subrasantes con materiales alternativos en caminos rurales. *Revista de Ingeniería Civil*, 27(1), 15–26.

