XXXIX

Estabilización de suelos expansivos mediante la adición de ceniza de cáscara de arroz y cal para el mejoramiento de subrasantes en pavimentos de la selva peruana

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

XXXIX

Estabilización de suelos expansivos mediante la adición de ceniza de cáscara de arroz y cal para el mejoramiento de subrasantes en pavimentos de la selva peruana

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

RESUMEN

Este capítulo de revisión narrativa examina la eficacia técnica, fisicoquímica y ambiental de la estabilización de suelos arcillosos expansivos mediante el uso combinado de ceniza de cáscara de arroz y cal para el mejoramiento de subrasantes viales en la selva peruana. A través del análisis crítico de literatura científica indizada publicada entre 2016 y 2026, se evidencia que la adición dual genera una modificación inmediata por intercambio catiónico, reduciendo de manera drástica la plasticidad y la expansividad, seguida de un endurecimiento puzolánico a largo plazo debido a la reacción entre la sílice amorfa y el hidróxido de calcio libre, lo que sintetiza geles cementantes de silicato y aluminato de calcio hidratado. Los estudios analizados demuestran incrementos sustanciales de hasta un cuatrocientos por ciento en el valor de soporte de carga, con dosificaciones óptimas que oscilan entre el tres y el ocho por ciento de cal y del diez al veinte por ciento de ceniza agroindustrial. Asimismo, se discuten detalladamente los retos operacionales en climas tropicales húmedos y se destaca que esta valorización de subproductos locales promueve activamente la economía circular, reduciendo pasivos ecológicos y optimizando de forma eficiente los presupuestos de construcción vial en la Amazonía.

Palabras clave: Suelos expansivos, ceniza de cáscara de arroz, cal, subrasante vial, economía circular.

ABSTRACT

This narrative review chapter examines the technical, physicochemical, and environmental efficacy of stabilizing expansive clay soils using a combination of rice husk ash and lime to improve road subgrades in the Peruvian rainforest. A critical analysis of indexed scientific literature published between 2016 and 2026 reveals that this dual addition triggers immediate modification via cation exchange—drastically reducing plasticity and expansiveness—followed by long-term pozzolanic hardening resulting from the reaction between amorphous silica and free calcium hydroxide, which synthesizes calcium silicate and calcium aluminate hydrate cementing gels. The studies analyzed demonstrate substantial increases—up to 400%—in load-bearing capacity, with optimal dosages ranging from 3% to 8% lime and 10% to 20% agro-industrial ash. Furthermore, the chapter discusses operational challenges in humid tropical climates and highlights how the valorization of local by-products actively promotes the circular economy, reducing environmental liabilities and efficiently optimizing road construction budgets in the Amazon region.

Keywords: Expansive soils, rice husk ash, lime, road subgrade, circular economy.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial en la selva peruana enfrenta desafíos geotécnicos severos debido a la presencia predominante de suelos finos con alta plasticidad y potencial de expansión, los cuales sufren variaciones volumétricas drásticas ante los ciclos de humedad y sequía propios del clima tropical húmedo. Estas condiciones provocan el colapso prematuro, agrietamiento y deformación de las capas de subrasante, comprometiendo la serviciabilidad y la vida útil de los pavimentos.

Tradicionalmente, la estabilización química se ha abordado mediante el uso exclusivo de cal o cemento; sin embargo, los costos económicos y la huella de carbono asociada a estos materiales han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles. Diversas investigaciones señalan que el empleo masivo de aditivos tradicionales incrementa de manera considerable los presupuestos de construcción en zonas de difícil acceso amazónico, lo que hace imperativa la valorización de subproductos industriales y agrícolas disponibles a escala local.

En este escenario, la incorporación de subproductos agroindustriales locales, específicamente la ceniza de cáscara de arroz (CCA) rica en sílice reactiva, combinada con cal, representa una solución técnicamente viable y ecológicamente sostenible. La CCA actúa como un material puzolánico que, al entrar en contacto con el hidróxido de calcio libre de la cal, genera reacciones químicas secundarias de cementación que incrementan la resistencia mecánica a largo plazo y reducen la compresibilidad del suelo arcilloso. Asimismo, el aprovechamiento de este residuo agroindustrial contribuye de forma directa a la mitigación de pasivos ambientales generados por su disposición inadecuada en zonas agrícolas.

A nivel regional y global, múltiples estudios respaldan que las mezclas optimizadas de cal y ceniza de cáscara de arroz disminuyen significativamente el índice de plasticidad y controlan el potencial de hinchamiento en subrasantes viales. No obstante, existe la necesidad de consolidar un análisis crítico sobre su comportamiento bajo las exigencias climáticas y geotécnicas específicas de la Amazonía peruana, donde factores como el régimen de precipitaciones y los niveles freáticos elevados influyen directamente en la durabilidad del tratamiento.

El objetivo de esta revisión narrativa es examinar el estado del arte sobre el comportamiento mecánico y fisicoquímico de los suelos expansivos tratados con CCA y cal, contextualizando su aplicación en proyectos viales de la región amazónica.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este estudio, se adoptó una metodología de revisión narrativa de la literatura científica, orientada a la recopilación, análisis crítico y síntesis de estudios experimentales, artículos de investigación y tesis doctorales publicados principalmente en bases de datos indizadas como Scopus, SciELO, Web of Science y Latindex durante el periodo 2016-2026. Este enfoque metodológico permite examinar de manera comprensiva el estado actual del conocimiento técnico sobre la materia, integrando hallazgos de diversas latitudes para entender la interacción entre los aditivos y los suelos cohesivos (Grant & Booth, 2009; Snyder, 2019).

Para asegurar la rigurosidad en la obtención de las fuentes bibliográficas, se establecieron estrategias de búsqueda estructuradas mediante la combinación de términos clave y operadores booleanos en los motores de búsqueda académicos. Específicamente, se utilizaron las siguientes cadenas de búsqueda: ("suelos expansivos" OR "expansive

soils") AND ("ceniza de cascara de arroz" OR "rice husk ash") AND ("cal" OR "lime") AND ("estabilizacion de subrasantes" OR "subgrade stabilization") AND ("pavimentos" OR "pavements"). Adicionalmente, se complementó la indagación con términos contextuales orientados a la región amazónica y los subproductos agroindustriales locales, siguiendo directrices de buenas prácticas en revisiones bibliográficas especializadas en ingeniería civil y geotecnia (Xiao et al., 2021).

Una vez ejecutada la búsqueda y depurados los registros duplicados, se aplicaron rigurosos criterios de selección para filtrar la información pertinente. Se incluyeron estudios empíricos y revisiones sistemáticas que evaluaran de forma explícita la dosificación de cal y ceniza de cáscara de arroz (CCA), así como aquellos trabajos que reportaran resultados cuantitativos y cualitativos sobre ensayos de límites de Atterberg, ensayos Proctor modificado, índice de valor de soporte de carga (CBR) y análisis mineralógicos avanzados mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEV). Por el contrario, se excluyeron investigaciones enfocadas en estabilizaciones con aditivos químicos sintéticos, polímeros industriales o aquellas que no detallaran de manera transparente las proporciones de mezcla empleadas en las fases experimentales (Cokca, 2001; Ali et al., 2022).

Finalmente, el proceso de síntesis cualitativa y temática estructuró la información seleccionada en cuatro ejes centrales: los mecanismos de reacción química involucrados en el sistema suelo-cal-CCA, la modificación de las propiedades físico-mecánicas y geotécnicas de las subrasantes, los efectos derivados de la determinación de la dosificación óptima de los aditivos, y las consideraciones ambientales y logísticas particulares para su implementación práctica en la Amazonía (Muntohar, 2017; Guerrero & Meza, 2023). Esta articulación temática facilitó una lectura crítica y comparativa de los datos reportados por la comunidad científica internacional durante la última década.

RESULTADOS

La literatura analizada evidencia que la combinación de cal y ceniza de cáscara de arroz modifica de manera significativa el comportamiento de los suelos cohesivos expansivos mediante un proceso dual de modificación inmediata y endurecimiento puzolánico a largo plazo (Bautista-De la Cruz & Ramos-Guillén, 2024). Este mecanismo integrado permite transformar la matriz de los suelos arcillosos problemáticos en plataformas

estables aptas para la cimentación de infraestructuras viales (Muntohar, 2017).

En cuanto a la modificación fisicoquímica, la adición inicial de cal provoca la flocculación y aglomeración de las partículas de arcilla por intercambio catiónico, reduciendo de manera inmediata el límite líquido, el índice de plasticidad y el potencial de expansión del suelo (Bell, 1996; Cokca, 2001). Posteriormente, la sílice amorfa contenida en la CCA reacciona en presencia de agua con el hidróxido de calcio libre para formar geles de silicato de calcio hidratado (CSH) y aluminato de calcio hidratado (CAH), compuestos cementantes que rellenan los vacíos de la estructura del suelo y confieren una mayor estabilidad estructural a lo largo del tiempo (Consoli et al., 2018; Yadu et al., 2019).

Respecto a la evolución de parámetros geotécnicos, los estudios reportan incrementos sustanciales en el valor del California Bearing Ratio (CBR), alcanzando mejoras porcentuales de hasta un 200% a un 400% respecto al suelo natural, dependiendo de la energía de compactación y el tiempo de curado (Piedra et al., 2021). Asimismo, se observa una disminución drástica en la expansión libre y la presión de hinchamiento, lo que mitiga notablemente los riesgos de agrietamiento y deformación prematura en las capas de subrasante (Rahman et al., 2020).

En relación con la dosificación óptima, la mayoría de las investigaciones coinciden en que los rangos de efectividad más altos se logran con proporciones que varían entre el 3% y el 8% de cal combinada con porcentajes de CCA que oscilan entre el 10% y el 20%, variando según la mineralogía específica de la arcilla, la cual suele estar dominada por minerales del grupo de la illita o la montmorillonita (Seco et al., 2011; Ali et al., 2022). La correcta proporción de ambos aditivos es determinante, ya que un déficit de cal impide la activación puzolánica de la ceniza, mientras que un exceso puede generar efectos de contracción indeseados en la matriz estabilizada (Guerrero & Meza, 2023).

DISCUSIÓN

Los hallazgos recopilados demuestran que el uso combinado de cal y ceniza de cáscara de arroz (CCA) no solo cumple con los requisitos normativos internacionales y nacionales para capas de subrasante mejorada, sino que mitiga las limitaciones individuales de cada aditivo (Guerrero & Meza, 2023; Horpibulsuk et al., 2011). El uso exclusivo de cal puede generar un costo elevado y problemas de contracción por

fraguado en ciertos contextos geotécnicos, mientras que la CCA por sí sola carece de la alcalinidad suficiente para activar la reacción puzolánica de manera espontánea; en consecuencia, la sinergia de ambos elementos optimiza la resistencia mecánica a un costo inferior en comparación con los estabilizantes químicos tradicionales (Muntohar, 2017; Ali et al., 2022). Esta complementabilidad fisicoquímica permite consolidar matrices más homogéneas y duraderas frente a las exigencias de carga vehicular pesada (Bautista-De la Cruz & Ramos-Guillén, 2024).

En el contexto específico de la selva peruana, la aplicación de esta tecnología presenta retos operacionales particulares. Los altos niveles de precipitación pluvial y los mantos freáticos superficiales, característicos de la región amazónica, exigen un control estricto en el manejo y almacenamiento tanto de la CCA como de la cal para evitar la hidratación prematura previa al mezclado en obra (Piedra et al., 2021; Rahman et al., 2020). Asimismo, la variabilidad en la composición orgánica de los suelos tropicales y la procedencia de la cáscara de arroz —cuyo rendimiento y calidad dependen directamente de factores como el contenido de carbono residual y la temperatura de quema en los molinos arroceros— exigen caracterizaciones mineralógicas rigurosas previas a cualquier diseño de mezcla a escala real (Ahmaruzzaman, 2010; Seco et al., 2011). Sin un control analítico estricto de la sílice amorfa y la reactividad del residuo, la eficacia del mejoramiento de la subrasante puede verse comprometida en campo (Yadu et al., 2019).

Desde una perspectiva de economía circular y sostenibilidad ambiental, la valorización de un residuo agroindustrial masivo en la región reduce los pasivos ambientales derivados de la disposición inadecuada de la cáscara de arroz y disminuye significativamente los costos de acarreo de materiales agregados de cantera, los cuales suelen ser escasos, costosos o de difícil acceso en zonas de selva baja (Centeno-Demera et al., 2024; Consoli et al., 2018). La integración de subproductos locales en la industria vial no solo alinea la infraestructura amazónica con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), sino que ofrece una respuesta técnica robusta ante la vulnerabilidad de los suelos finos expansivos, optimizando los presupuestos de inversión pública y privada en la región (Xiao et al., 2021).

CONCLUSIÓN

La estabilización de suelos expansivos mediante la adición combinada de ceniza de cáscara de arroz y cal constituye una alternativa técnica y ambientalmente sólida para el mejoramiento de subrasantes viales en la selva peruana. La evidencia bibliográfica analizada a lo largo de este estudio confirma que esta mezcla dual reduce de forma eficiente la plasticidad y la expansividad de las arcillas locales, neutralizando las severas variaciones volumétricas características de los climas tropicales húmedos. Asimismo, se incrementa notablemente la capacidad portante y el valor de soporte de carga (CBR) mediante la generación progresiva de compuestos puzolánicos estables, tales como los geles de silicato de calcio hidratado, que rellenan eficientemente los vacíos estructurales del suelo.

Desde una perspectiva operativa y socioeconómica, su implementación fomenta de manera directa la sostenibilidad en la infraestructura de transporte regional al aprovechar un subproducto agroindustrial local y abundante que de otro modo representaría un pasivo ambiental para los sectores agrícolas. Esto permite optimizar significativamente los recursos económicos destinados a la adquisición y acarreo de agregados pétreos tradicionales, los cuales suelen escasear en las zonas de selva baja. En consecuencia, el uso sinérgico de cal y ceniza de cáscara de arroz no solo resuelve problemas geotécnicos complejos en capas de subrasante, sino que también mitiga los impactos ambientales asociados a la ejecución de proyectos viales en ecosistemas amazónicos altamente sensibles, consolidándose como un modelo replicable de ingeniería vial sostenible y eficiente.

REFERENCIAS

Ahmaruzzaman, M. (2010). Industrial wastes (fly ash, bottom ash, and rice husk ash) and their applications: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(7), 3113–3126. https://doi.org/10.1021/ie901990x

Ali, K., Khan, M. A., & Qureshi, M. U. (2022). Sustainable geotechnics: Utilization of agricultural wastes in expansive soil stabilization. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(3), 890–905. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.012

Bautista-De la Cruz, M., & Ramos-Guillén, S. (2024). Influencia de la ceniza de cáscara de arroz y cal hidratada en las propiedades mecánicas de subrasantes en la región amazónica. *Tecnología y Construcción*, 39(1), 89–104. https://doi.org/10.5377/tec.v39i1.15234

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clayey soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 54(1), 223–229. https://doi.org/10.1007/BF02594954

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.v7i14.0212

Cokca, E. (2001). Use of granulated blast furnace slag and class C fly ash for the stabilization of an expansive soil. *Waste Management*, 21(8), 715–720. https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00017-9

Consoli, N. C., Rosa, A. D., & Cruz, R. C. (2018). Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), 04018032. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002201

Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal,* 26(2), 91–108. https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x

Guerrero, L., & Meza, K. (2023). Economía circular en la pavimentación vial: uso de cenizas agroindustriales para la estabilización de suelos finos en el Perú. *Infraestructura Vial*, 25(50), 33–48. https://doi.org/10.15517/iv.v25i50.51290

Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., & Chinkulkijniwat, A. (2011). Soil stabilization by calcium carbide residue and rice husk ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(3), 284–293. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000160

Muntohar, A. S. (2017). Influence of rice husk ash and lime on engineering properties of a clayey soil. *Construction and Building Materials*, 141, 102–115. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.138

Piedra, J., Vásquez, J., & Arriola, G. (2021). Evaluación de la estabilización de un suelo

expansivo utilizando ceniza de cáscara de arroz, distrito de Jaén, Cajamarca, Perú. *Revista INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación,* 8(2), 125–134. https://doi.org/10.26495/icti.v8i2.1926

Rahman, M. A., Imteaz, M. A., & Arulrajah, A. (2020). Soil stabilization using a mixture of rice husk ash and lime: A literature review. *International Research Journal of Civil and Environmental Engineering,* 7(2), 45–58.

Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., & García, B. (2011). Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science*, 51(3), 348–352. https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.12.027

Sharma, R. S., Phani Kumar, B. R., & Nagendra, Prasad, K. (2014). Compressive strength and expansivity of clayey soils treated with lime and rice husk ash. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 26(8), 04014032. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000947

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Xiao, Y., Liu, H., & Chen, Y. (2021). Review on sustainable soil stabilization techniques using industrial and agricultural by-products. *Transportation Geotechnics*, 29, 100570. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100570

Yadu, L., Tripathi, R. K., & Singh, D. (2019). Compressibility and swelling behavior of expansive soil stabilized with industrial and agricultural wastes. *Geotechnical and Geological Engineering,* 37(2), 945–957. https://doi.org/10.1007/s10706-018-0658-3