

Sustainable Stabilization of Expansive Clays with Rice Husk Ash and Lime: An Experimental Approach

Eddimson Grimaldo Espinoza Vega¹; Said Alexander Martel Obregón²; Gary Gary Durán Ramírez³

^{1,2}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, U20201B423@upc.edu.pe, U20201A970@upc.edu.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, PEGDURAN@upc.edu.pe

Abstract– Expansive clayey soils exhibit high deformability and volumetric changes that can generate instability and failures in civil structures. To address this problem, an experimental quantitative study was conducted using lime and rice husk ash (RHA), abundant residues in agricultural production. The clayey soil, classified as CH and A-7-6, was obtained from Villa Rica (Pasco, Peru) and was subjected to characterization tests (moisture content, consistency limits and particle size), as well as Modified Proctor compaction tests and unconfined compression (UCS). The results showed that the addition of RHA and lime increases the unconfined compressive strength, with the mixture with 3% lime and 6% RHA standing out as the most effective. X-ray fluorescence analysis confirms the high silica content in RHA, which enhances its pozzolanic properties when reacting with lime. These findings demonstrate that the combination of lime and CCA is a sustainable and efficient alternative to improve the mechanical properties of problematic clayey soils, thus reducing deformability and contributing to the construction of safer infrastructures.

Keywords– Soil stabilization, rice husk ash, lime, unconfined compression, clay soil.

Estabilización Sostenible de Arcillas Expansivas con Ceniza de Cáscara de Arroz y Cal: Un Enfoque Experimental

Eddimson Grimaldo Espinoza Vega¹; Said Alexander Martel Obregón²; Gary Gary Durán Ramirez³

^{1,2}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, U20201B423@upc.edu.pe, U20201A970@upc.edu.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, PEGDURAN@upc.edu.pe

Resumen— Los suelos arcillosos expansivos presentan alta deformabilidad y cambios volumétricos que pueden generar inestabilidad y fallas en estructuras civiles. Para abordar este problema, se realizó un estudio cuantitativo experimental empleando cal y ceniza de cáscara de arroz (CCA), residuos abundantes en la producción agrícola. El suelo arcilloso, clasificado como CH y A-7-6, se obtuvo de Villa Rica (Pasco, Perú) y se sometió a ensayos de caracterización (contenido de humedad, límites de consistencia y granulometría), así como a pruebas de compactación Proctor Modificado y compresión no confinada (UCS). Los resultados evidenciaron que la adición de CCA y cal aumenta la resistencia a la compresión no confinada, destacando la mezcla con 3% de cal y 6% de CCA como la más efectiva. El análisis de fluorescencia de rayos X confirmó el alto contenido de sílice en la CCA, lo que potencia sus propiedades puzolánicas al reaccionar con la cal. Estos hallazgos demuestran que la combinación de cal y CCA es una alternativa sostenible y eficiente para mejorar las propiedades mecánicas de suelos arcillosos problemáticos, reduciendo así la deformabilidad y contribuyendo a la construcción de infraestructuras más seguras.

Palabras clave— Estabilización de suelos, ceniza de cáscara de arroz, cal, resistencia a la compresión no confinada, suelo arcilloso.

I. INTRODUCCIÓN

Los suelos arcillosos se caracterizan por su alta deformabilidad y cambios volumétricos notables en respuesta a variaciones en el contenido de humedad. Estos suelos contienen una alta proporción de partículas finas, compuestas predominantemente por minerales como la montmorillonita, que absorbe agua en su estructura molecular, y la caolinita, con presencia de illita. La capacidad de la montmorillonita para retener agua conduce a una expansión significativa cuando el suelo está húmedo y a una contracción al secarse, generando así un comportamiento inestable. Esta inestabilidad, sumada a la baja capacidad portante de los suelos arcillosos, plantea un desafío crítico para las estructuras civiles construidas sobre ellos, como pavimentos, terraplenes y edificaciones, que pueden sufrir fallas estructurales, grietas e incluso colapsos [1].

La estabilización de suelos arcillosos ha sido objeto de numerosos estudios debido a la necesidad de mejorar sus propiedades mecánicas y reducir su inestabilidad bajo diversas condiciones ambientales. Diversas técnicas y materiales han sido utilizados para este fin, incluyendo el uso de aditivos como cenizas, fibras sintéticas y otros residuos agroindustriales. Sin

embargo, el uso de ceniza de cáscara de arroz (RHA) como estabilizador en suelos arcillosos ha ganado especial atención debido a sus propiedades puzolánicas y la abundancia del material como residuo agroindustrial. Por ejemplo, en la referencia [2], estudiaron su influencia en la estabilidad y resistencia de suelos bajo condiciones de ciclos de congelación y descongelación, encontrando que el contenido óptimo de humedad aumentaba y la densidad máxima seca disminuía con mayores dosis de RHA (hasta un 12%). Además, los límites líquido y plástico también aumentaron, lo que indica una mejora en la consistencia del suelo tratado. En esa misma línea, en la referencia [3], exploraron el efecto del curado en la consistencia y compactación de arcillas tratadas con ceniza de cáscara de arroz y de semilla de palma (PKSA). Mediante análisis de rayos X, difracción láser y pruebas de consistencia, determinaron que el aumento en el contenido de estabilizador resultaba en un incremento de los límites líquido y plástico, con la RHA mostrando una mayor influencia en la mejora de las propiedades plásticas de las arcillas.

De manera similar, en la referencia [4] determinaron que la adición de RHA en un suelo arcilloso de baja plasticidad utilizado como subrasante para pavimentos incrementó significativamente la capacidad de resistencia del suelo, pasando del 4.30% al 20.70% con una dosificación de 20% de RHA, lo que permitió considerar el suelo estabilizado como una subrasante de muy buena calidad. Estos resultados subrayan la eficacia de la ceniza de cáscara de arroz en la mejora de las propiedades geotécnicas del suelo. De forma similar, en la referencia [5] investigaron la estabilización de suelos arcillosos con mezclas de ceniza de cáscara de arroz (RHA) y ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA), observando una reducción de la expansividad y un aumento en la densidad máxima seca, especialmente con un 5% de reemplazo de RHA, lo que llevó a una capacidad de resistencia del suelo máximo de 33.75%. Estos hallazgos destacan el potencial de usar cenizas de residuos agroindustriales para la mejora de suelos, particularmente en suelos expansivos. Además, en la referencia [6] evaluaron el impacto de la adición de RHA en suelos arcillosos estabilizados con cal, encontrando que la capacidad de resistencia del suelo aumentó significativamente hasta un 51.3% con 16% de RHA y 3% de cal. Sin embargo, señalaron

que un mayor porcentaje de RHA podría disminuir la efectividad de la estabilización, lo que sugiere que la cal sola podría ser suficiente para suelos arcillosos ricos en sílice.

A continuación, se plantea que el uso de la ceniza de cáscara de arroz (CCA), un subproducto agrícola rico en sílice amorfa ha mostrado ser eficaz en la modificación de suelos, en particular cuando se emplea junto con la cal [7]. El alto contenido de sílice de la ceniza de CCA permite que reaccione con la cal para formar compuestos cementantes, mejorando así la cohesión y resistencia del suelo [8]. Cuando se añade cal, se aporta calcio al suelo, que, en presencia de sílice, promueve la formación de fases mineralógicas estables y duraderas, responsables del aumento en la resistencia a la compresión y la durabilidad del suelo estabilizado [9].

Este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de la combinación de ceniza de cáscara de arroz y cal en la resistencia a la compresión de suelos arcillosos mediante ensayos de rayos X, los cuales permiten identificar cambios en la composición química del suelo.

En ese sentido, La investigación contribuye a la geotecnia al mostrar que el uso combinado de RHA y cal mejora significativamente la resistencia a la compresión de suelos arcillosos, ofreciendo una solución de estabilización que no solo es efectiva, sino también económica y sostenible [10]. Este enfoque utiliza subproductos agrícolas en lugar de aditivos convencionales, lo que promueve prácticas de construcción más sostenibles y apoya la reducción de desechos agrícolas [7]. Además, los resultados del estudio proponen un método viable para la reutilización de residuos agrícolas en la estabilización de suelos, en consonancia con los principios de construcción sostenible y la economía circular.

II. METODOLOGÍA

El presente estudio se caracterizó por un enfoque cuantitativo experimental. El material de suelo arcilloso fue obtenido en la provincia de Oxapampa en la localidad de Villa Rica, para extraerlo se realizó una excavación descontando 10cm de capa vegetal, luego se siguió excavando hasta llegar a una profundidad de 1.50m. Por otro lado, la ceniza de cáscara de arroz fue obtenida del laboratorio donde se realizaron los ensayos, este laboratorio se encargó de realizar el quemado altas temperaturas para que la CCA pueda utilizarse adecuadamente como aditivo y de esta manera estabilizar el suelo arcilloso.

El material fue sometido a condiciones controladas en el laboratorio de suelos, donde se realizaron diversos ensayos de caracterización de acuerdo con las normas ASTM. Estos incluyeron el contenido de humedad (ASTM D2216), límites de consistencia (ASTM D4318), análisis granulométrico (ASTM D6913), y clasificación de suelos según SUCS (ASTM D2487) y AASHTO (ASTM D3282). Los resultados de estos ensayos permitieron caracterizar el material como una arcilla de alta plasticidad con presencia de arena, clasificado como CH según el sistema de clasificación SUCS y A-7-6 de acuerdo con el sistema AASHTO tal como se aprecia en la tabla 1

TABLA 1
CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Clasificación del suelo	
SUCS (ASTM D2487)	C-H
AASHTO (ASTM D3282)	A-7-6

En el diseño experimental, se establecieron procedimientos de laboratorio para evaluar la influencia de la ceniza de cáscara de arroz (CCA) y la cal en la estabilización del suelo. Se realizaron ensayos de Proctor Modificado, siguiendo la norma ASTM D1557 [8], para determinar la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad de cada muestra. Este ensayo fue aplicado a un total de siete muestras, incluyendo suelo natural, suelo con CCA al 3%, 6%, y 9%, y suelo combinado con CCA al 3%, 6%, y 9%, junto con un 3% de cal, en la tabla 2 se aprecian las 7 muestras.

TABLA 2
MUESTRAS Y PORCENTAJES DE ADITIVOS

Nomenclatura	Muestra	% CCA	% Cal
Suelo Natural	Suelo natural	0%	0%
S-CCA3	Suelo con 3% de CCA	3%	0%
S-CCA6	Suelo con 6% de CCA	6%	0%
S-CCA9	Suelo con 9% de CCA	9%	0%
S-CCA3-Cal3	Suelo con 3% de CCA y 3% de cal	3%	3%
S-CCA6-Cal3	Suelo con 6% de CCA y 3% de cal	6%	3%
S-CCA9-Cal3	Suelo con 9% de CCA y 3% de cal	9%	3%

Se realizaron cuatro repeticiones de este ensayo para cada mezcla con el objetivo de obtener valores representativos de la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo, ambos necesarios para los ensayos posteriores de resistencia a la compresión no confinada (UCS).

Para el ensayo UCS, realizado conforme a la norma ASTM D2166 [9], se prepararon los especímenes con la Densidad Seca Máxima y el Porcentaje Óptimo de Humedad determinado previamente en el Proctor Modificado. La mezcla de suelo y aditivos fue homogeneizada en bandejas, compactada en moldes cilíndricos de 140 mm de altura y 69.97 mm de diámetro, y sellada con bolsas herméticas y papel film para evitar la pérdida de humedad. Cada muestra fue curada durante 24 horas para asegurar la reacción adecuada de los aditivos con el suelo.

Durante el ensayo UCS, los especímenes fueron colocadas en la máquina de compresión no confinada, aplicando una carga axial a una velocidad constante de 0.25 mm/min. Se registró la carga y la deformación hasta alcanzar el fallo donde la carga máxima comenzaba a disminuir o cuando ocurría una deformación significativa sin aumento adicional de carga [9].

Se realizaron ensayos de Fluorescencia de Rayos X (XRF) en muestras de CCA y en el suelo arcilloso natural sin aditivos. Estos ensayos permitieron analizar la composición química de la CCA y del suelo natural. La ceniza de cáscara de arroz, al quemarse adecuadamente, puede contener un alto porcentaje de óxido de silicio (SiO_2), que reacciona con la cal y contribuye a la formación de compuestos cementantes [10]. La composición química del suelo arcilloso es fundamental para entender su capacidad de reacción y su comportamiento frente a la estabilización.

El análisis de la CCA mediante XRF permite determinar la presencia de compuestos como SiO_2 , Al_2O_3 y otros óxidos que juegan un papel crucial en la formación de compuestos hidráulicos cuando se mezclan con cal (CaO).

III. RESULTADOS

A. Próctor modificado

Los resultados para los ensayos de Proctor modificado obtenidos muestran que la muestra de suelo natural presentó una densidad seca máxima (DSM) de 1.558 kg/cm^3 y un contenido óptimo de humedad (COH) de 19.9%. Al adicionar un 3% de ceniza de cáscara de arroz (CCA), la DSM fue de 1.549 kg/cm^3 y el COH aumentó a 20.1%. Con un 6% de CCA, la DSM disminuyó ligeramente a 1.544 kg/cm^3 , mientras que el COH se incrementó a 21.7%. En la mezcla con 9% de CCA, la DSM fue de 1.538 kg/cm^3 y el COH alcanzó el 23.7%. En cuanto a las combinaciones de CCA y cal, la mezcla con 3% de cal y 3% de CCA presentó una DSM de 1.542 kg/cm^3 y un COH de 21.3%. Para la mezcla con 6% de CCA y 3% de cal, la DSM fue de 1.539 kg/cm^3 , con un COH de 22.1%. Finalmente, para la mezcla con 9% de CCA y 3% de cal, la DSM fue de 1.527 kg/cm^3 y COH fue de 24.4%.

TABLA 3
DSM Y COH OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

Muestra	Densidad seca máxima (kg/cm^3)	Contenido óptimo de humedad(%)
Suelo natural	1.558	19.9
CCA3	1.549	20.1
CCA6	1.544	21.7
CCA9	1.538	23.7
CCA3+CAL3	1.542	21.3
CCA6+CAL3	1.539	22.1
CCA9+CAL3	1.527	24.4

B. Ensayos de compresión no confinada (UCS)

En los resultados para los ensayos de compresión no confinada (UCS) sobre diferentes muestras de suelo se observa que, para el suelo arcilloso sin aditivos, la resistencia a la compresión no confinada fue de 18.309 Kg/cm^2 y la resistencia al corte no confinado fue de 9.154 Kg/cm^2 .

Al adicionar un 3% de CCA, la UCS incrementó a 38.237 Kg/cm^2 . Con una adición del 6% de CCA, la resistencia a la compresión no confinada fue de 29.937 Kg/cm^2 . Finalmente, con un 9% de CCA, la resistencia a la compresión no confinada alcanzó los 33.884 Kg/cm^2 .

Se realizaron ensayos adicionales al suelo arcilloso con una combinación de 3% de cal y diferentes proporciones de CCA. Para la mezcla con 3% de cal y 3% de CCA, la resistencia a la compresión no confinada fue de 39.228 Kg/cm^2 . La mezcla con 3% de cal y 6% de CCA mostró una resistencia a la compresión no confinada de 53.914 Kg/cm^2 . Finalmente, para la mezcla con 3% de cal y 9% de CCA, la UCS fue de 34.058 Kg/cm^2 .

En la tabla 4 se muestran los valores de resistencia a la compresión no confinada para todas las mezclas obtenidas en el ensayo de compresión no confinada (UCS).

TABLA 4
COMBINACIONES EN LAS MEZCLAS Y RESULTADOS DE ENSAYO UCS

Mezclas	Resistencia a Compresión No Confinada (Kg/cm^2)
Suelo sin aditivos	18.309
3% CCA	35.237
6% CCA	41.215
9% CCA	33.884
3% Cal + 3% CCA	42.228
3% Cal + 6% CCA	47.892
3% Cal + 9% CCA	39.058

C. Ensayos de Composición Química

Se realizaron ensayos de análisis de composición química tanto al suelo arcilloso natural como a la ceniza de cáscara de arroz (CCA), con el objetivo de determinar su capacidad reactiva y potencial de estabilización en suelos. Los resultados de la composición química del suelo arcilloso muestran que este contiene un 36.909% de óxido de silicio (SiO_2), 19.810% de óxido de hierro (Fe_2O_3) y 9.610% de óxido de aluminio (Al_2O_3), junto con un 5.491% de óxido de potasio (K_2O) y un 1.825% de óxido de titanio (TiO_2). Adicionalmente, se observó una pérdida por calcinación del 25.420%, lo que indica la presencia de materiales volátiles o componentes orgánicos que podrían afectar la reactividad del suelo en mezclas con aditivos estabilizantes.

TABLA 5
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL SUELO ARCILLOSO NATURAL

Muestra	Composición química	Unidad	Resultados
Suelo natural	Óxido de Silicio, SiO_2	%	36.909
	Óxido de Hierro, Fe_2O_3	%	19.81
	Óxido de Aluminio, Al_2O_3	%	9.61
	Óxido de Potasio, K_2O	%	5.491

Óxido de Titanio, TiO ₂	%	1.825
Óxido de Fósforo, P ₂ O ₅	%	0.251
Dióxido de Zirconio, ZrO ₂	%	0.145
Óxido de Manganeso, MnO	%	0.144
Óxido de Vanadio, V ₂ O ₅	%	0.143
Óxido de Zinc, ZnO	%	0.105
Óxido de Estroncio, SrO	%	0.034
Óxido de cromo, Cr ₂ O ₃	%	0.024
Óxido de Itrio, Y ₂ O ₃	%	0.024
Óxido de Cobre, CuO	%	0.019
Óxido de Níquel, NiO	%	0.014
Óxido de Galio, Ga ₂ O ₃	%	0.013
Óxido de Plomo, PbO	%	0.012
Óxido de Niobio, NbO	%	0.007
Pérdida por calcinación	%	25.42

Por otro lado, la CCA analizada mostró una composición dominada por óxido de silicio (SiO₂) con un valor elevado de 80.056%, seguido de óxido de potasio (K₂O) en un 8.795% y óxido de calcio (CaO) en un 5.217%. Estos valores sugieren un alto potencial puzolánico de la CCA, especialmente debido a su contenido significativo de sílice amorfa, que es un componente esencial para las reacciones de estabilización al combinarse con cal. Otros componentes, como el óxido de fósforo (P₂O₅) con un 1.990% y el óxido de manganeso (MnO) con un 1.079%, también pueden contribuir a la durabilidad y resistencia de la mezcla estabilizadora.

TABLA 6
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CCA

Muestra	Composición química	Unidad	Resultados
Ceniza de cáscara de arroz	Óxido de Silicio, SiO ₂	%	80.056
	Óxido de Potasio, K ₂ O	%	8.795
	Óxido de Calcio, CaO	%	5.217
	Óxido de Fósforo, P ₂ O ₅	%	1.99
	Óxido de Manganeso, MnO	%	1.079
	Óxido de Azufre, SO ₃	%	0.915
	Cloro, Cl	%	0.878
	Óxido de Hierro, Fe ₂ O ₃	%	0.826
	Óxido de Zinc, ZnO	%	0.098
	Óxido de Titanio, TiO ₂	%	0.063
	Óxido de Rubidio, Rb ₂ O	%	0.025

Óxido de Estroncio, SrO	%	0.023
Óxido de Cobre, CuO	%	0.012
Óxido de Arsénico, As ₂ O ₃	%	0.011
Bromo, Br	%	0.008
Dióxido de Zirconio ZrO ₂	%	0.004

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Proctor modificado

En los ensayos de compactación tipo Proctor Modificado se obtuvieron dos parámetros fundamentales: la Densidad Seca Máxima (DSM) y el Contenido Óptimo de Humedad. Estos valores son esenciales, ya que sirven como referencia para preparar las muestras utilizadas en los ensayos de compresión no confinada, permitiendo evaluar el comportamiento mecánico del suelo tratado.

En cuanto a la Densidad Seca Máxima (DSM), se observa una tendencia a disminuir conforme se incrementa el reemplazo del suelo arcilloso por aditivos como la cal o la ceniza de cáscara de arroz. Este comportamiento se debe a que los aditivos, al tener una densidad menor que la del suelo arcilloso natural, reducen la densidad global de la mezcla compactada.

Esta tendencia se muestra en el siguiente gráfico adjunto, donde se observa claramente cómo la densidad seca máxima disminuye a medida que aumenta la proporción de aditivo en la mezcla.

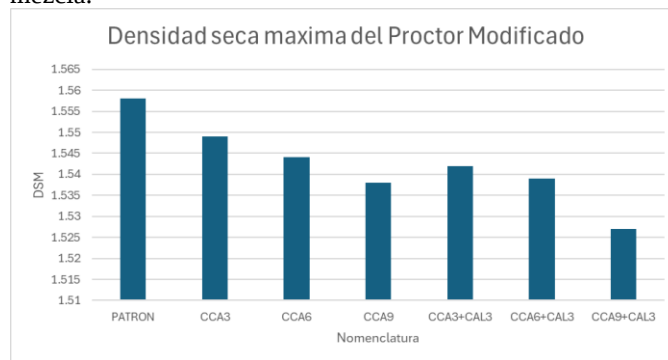


Fig 1. Densidad Seca Máxima obtenida de los ensayos de Proctor Modificado

Por otro lado, se evaluó el COH, observándose que este aumenta a medida que se incrementa la proporción de aditivos, como la cal y la CCA, en la mezcla. Este comportamiento se debe a que estos aditivos requieren una mayor cantidad de agua para que se produzcan las reacciones químicas necesarias tanto entre ellos como con los componentes del suelo arcilloso.

En el suelo estabilizado, el agua actúa no solo como un agente cohesivo, sino también como un catalizador que permite que ocurran las reacciones químicas de hidratación y puzolánicas.

En el caso de la cal, el agua es indispensable para que esta se disuelva y forme hidróxido de calcio, el cual reacciona con

los compuestos del suelo. De igual manera, la ceniza de cáscara de arroz, al ser rica en sílice amorfa, requiere agua para interactuar con el hidróxido de calcio y generar compuestos cementantes como los silicatos de calcio hidratados. Este proceso es esencial para mejorar las propiedades mecánicas y químicas del suelo, pero también incrementa la demanda de humedad en la mezcla.

Este aumento en el COH refleja la necesidad de proporcionar suficiente agua para garantizar que estas reacciones sean completas, optimizando así el rendimiento del suelo estabilizado. El comportamiento descrito puede observarse en el gráfico adjunto.

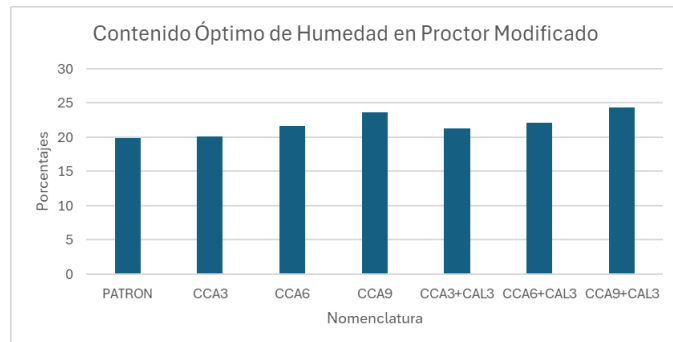


Fig 2. Contenido Óptimo de Humedad en Proctor Modificado

B. Fluorescencia de Rayos X

La composición química del suelo arcilloso muestra que su principal componente es el óxido de silicio (SiO_2) (36.909%), seguido del óxido de hierro (Fe_2O_3) (19.81%) y el óxido de aluminio (Al_2O_3) (9.61%). Estos compuestos son característicos de suelos arcillosos con poca capacidad de auto consolidación química debido a la ausencia de óxido de calcio (CaO), que es un agente fundamental en reacciones puzolánicas y de estabilización.

Por otro lado, la pérdida por calcinación (25.42%) refleja la presencia de materiales orgánicos y agua combinada, comunes en suelos con alto contenido arcilloso. En el gráfico se muestra el porcentaje de cada componente en la composición del suelo natural.

Composición Química de Suelo arcilloso natural

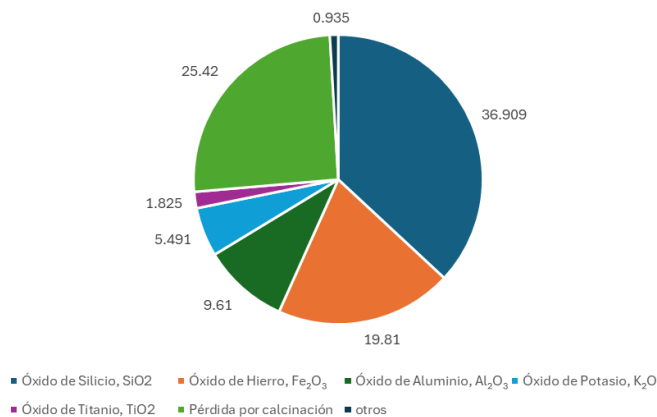


Fig 3. Composición Química Suelo arcilloso natural

Con respecto a la Ceniza de Cáscara de arroz (CCA), es predominantemente óxido de silicio (SiO_2) (80.056%), lo que le confiere propiedades puzolánicas al reaccionar con hidróxido de calcio en presencia de agua. Sin embargo, su contenido de óxido de calcio (CaO) es limitado (5.217%), insuficiente para proporcionar por sí solo el nivel óptimo de estabilización requerido. En el siguiente gráfico se puede observar la como el Óxido de Silicio prevalece en la composición química de la CCA

Composición química de la ceniza de cáscara de arroz

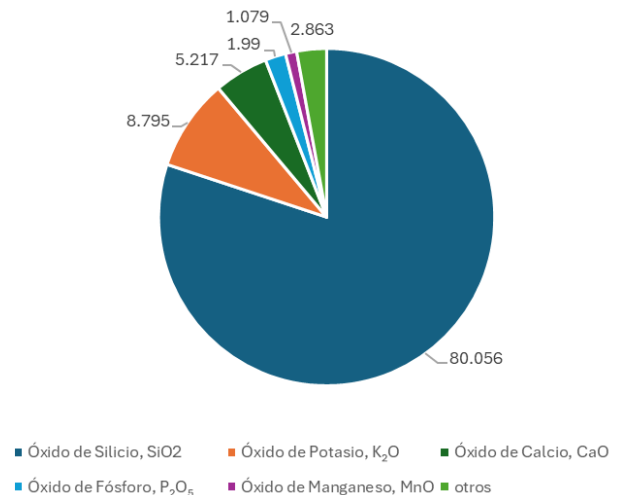


Fig 4. Composición Química de la Ceniza de Cáscara de Arroz

C. Resistencia a la Compresión No Confinada (UCS)

Para empezar con estos ensayos se usó los datos de Proctor Modificado, se tuvo en cuenta el porcentaje de compactación que se da en relación con la DSM y llevar el espécimen al COH al 100%. En el siguiente gráfico se muestra que el porcentaje de compactación que se logró con cada una de las muestras para la realización de los ensayos de Compresión no Confinada es mayor al 95%.

El valor inicial de 18.309 kg/cm^2 refleja las propiedades mecánicas del suelo arcilloso natural, que tiene una resistencia baja debido a su estructura interna poco consolidada. La falta de óxido de calcio (CaO) en su composición impide la formación de reacciones puzolánicas que puedan mejorar sus características de resistencia.

Al agregar Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA) en concentraciones del 3%, 6% y 9%, se observa una mejora significativa en la UCS, alcanzando el valor máximo de 41.215 kg/cm^2 con un 6% de CCA. Este aumento se debe al alto contenido de óxido de silicio (SiO_2) en la CCA, que posee propiedades puzolánicas y, al reaccionar con el agua, refuerza la estructura del suelo.

No obstante, cuando la proporción de CCA aumenta al 9%, la UCS disminuye ligeramente a 33.884 kg/cm^2 . Este fenómeno puede explicarse por la presencia excesiva de material

puzolánico, lo que genera una estructura más porosa y reduce la densidad del suelo estabilizado.

Por otro lado, al combinar 3% de cal con diferentes cantidades de CCA, se observa un aumento notable en la resistencia a la compresión no confinada, alcanzando valores superiores a los de las mezclas con solo CCA. La cal, al aportar óxido de calcio (CaO), reacciona con los compuestos puzolánicos (SiO_2 y Al_2O_3) presentes tanto en el suelo como en la CCA, formando productos que mejoran la cohesión del material.

La mezcla óptima se encuentra en la combinación de 3% de cal y 6% de CCA, donde la resistencia a la compresión no confinada alcanza los 47.892 kg/cm^2 . Este valor refleja un equilibrio adecuado entre los compuestos químicos que favorecen la formación de silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH), los cuales incrementan significativamente la cohesión interna del suelo.

Sin embargo, al aumentar la cantidad de CCA al 9%, la resistencia a la compresión no confinada disminuye a 39.058 kg/cm^2 . Esto se debe a la mayor porosidad generada por el exceso de CCA, lo que dificulta la formación de una matriz densa y homogénea.

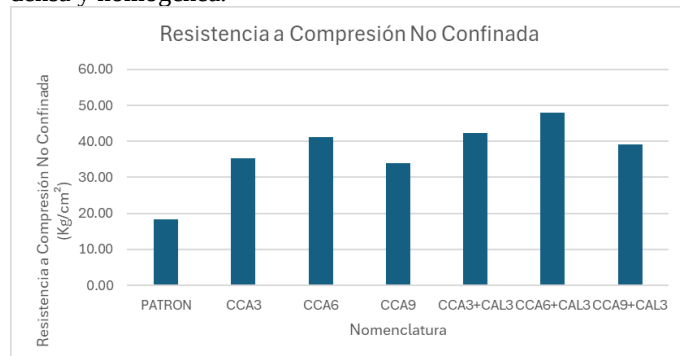


Fig 5. Resistencia a la Compresión no Confinada

V. CONCLUSIONES

A partir de los ensayos de compactación de Proctor Modificado se determinó que el aumento en la proporción de aditivos provoca una disminución en la DSM, lo cual se atribuye a la menor densidad de estos materiales en comparación con el suelo arcilloso original. Esto implica que, a medida que se incrementan los aditivos, se reduce la capacidad de compactación del material.

Por otro lado, el COH aumenta con la inclusión de cal y ceniza de cáscara de arroz. Este fenómeno es consecuencia de la necesidad de agua para facilitar las reacciones químicas entre los aditivos y los componentes del suelo, como la hidratación de la cal y la reacción puzolánica con la ceniza. La mayor demanda de agua en las mezclas estabilizadas es crucial para el éxito de la estabilización, ya que optimiza la formación de compuestos cementantes que mejoran las propiedades mecánicas del suelo.

La fluorescencia de rayos X ha permitido identificar que el suelo arcilloso tiene una composición química que favorece la estabilización con aditivos puzolánicos, especialmente debido

a la alta concentración de óxido de silicio (SiO_2) en la ceniza de cáscara de arroz. Sin embargo, la baja cantidad de óxido de calcio (CaO) en la ceniza por sí sola limita su capacidad de estabilización. La combinación de cal con ceniza de cáscara de arroz, en proporciones específicas, resulta ser más efectiva para mejorar la resistencia mecánica del suelo estabilizado, ya que la cal proporciona el CaO necesario para activar las reacciones puzolánicas.

En los ensayos de compresión no confinada (UCS), las mezclas de suelo con CCA mostraron una mejora significativa en la resistencia a la UCS con el suelo no tratado. La proporción de 6% de CCA alcanzó el valor máximo de resistencia, lo que indica que en esta proporción se logra el mejor equilibrio entre la disponibilidad de reactivos y la formación de una estructura cohesiva. Sin embargo, al aumentar la cantidad de CCA al 9%, la resistencia disminuyó ligeramente debido al exceso de material puzolánico, lo que aumentó la porosidad de la mezcla.

Finalmente, las mezclas de cal y CCA demostraron un impacto positivo en la resistencia mecánica del suelo estabilizado, con la combinación de 3% de cal y 6% de ceniza de cáscara de arroz alcanzando la mayor resistencia a la compresión no confinada. Estos resultados sugieren que la estabilización del suelo arcilloso con cal CCA puede ser una solución efectiva para mejorar las propiedades geotécnicas de suelos problemáticos, proporcionando una alternativa sostenible y económica para la mejora de terrenos.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

A. Eddimson Grimaldo Espinoza Vega

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, Judith Vega Gaspar y Ramiro Caballero Benavides, quienes con su esfuerzo, sacrificio y amor incondicional han hecho posible que yo pueda alcanzar mis metas académicas y profesionales. Su dedicación incansable y su compromiso con mi educación me han brindado las oportunidades necesarias para avanzar en mi formación como ingeniero civil. Gracias por creer en mí, por enseñarme el valor del trabajo duro y por estar siempre a mi lado, incluso en los momentos más desafiantes.

A mis hermanos, Yulissa Espinoza Vega, Lucero Caballero Vega y Dayiro Caballero Vega, les agradezco profundamente por su apoyo constante, su motivación y por ser una fuente de inspiración en mi vida. Sus palabras de aliento y su confianza en mis capacidades me han dado la fuerza para superar los retos y seguir adelante.

B. Said Alexander Martel Obregón

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido al desarrollo de este trabajo. En primer lugar, un agradecimiento a mis padres: Otto Americo Martel Solano, mi madre Ruth Noemi Obregón Flores y mi hermano Andre Gianpierre Martel Obregón, quienes han sido mi fuente constante de apoyo, amor y motivación. Su paciencia, comprensión y confianza en mí han sido fundamentales para que pueda alcanzar este logro. Agradezco cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y, sobre todo, el amor incondicional que me han brindado a lo largo de todo este

proceso. Sin ellos, este trabajo no habría sido posible. De igual manera, quiero extender mi agradecimiento a mi familia, amigos, compañeros de la universidad y todas las personas que me han brindado su estima y apoyo. Gracias por estar a mi lado, por compartir su tiempo, por sus palabras de ánimo.

C. Ambos autores

Agradecemos profundamente a los pobladores de Villa Rica por su cálida acogida y generosa disposición durante nuestra visita de campo. Su apoyo y hospitalidad fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. [

REFERENCIAS

- [1] Quintero, L. J., & Gallardo, R. J. "Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización." *Revista Ingenio*, vol. 8, no. 1, 2015, pp. 83–92. doi: 10.22463/2011642X.2050
- [2] Li, B., Luo, F., Li, X., & Liu, J. "Mechanical properties evolution of clays treated with rice husk ash subjected to freezing-thawing cycles." *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, 2024, e02712. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02712
- [3] Jamil, M., Hayano, K., Kassa, A., Sekine, R., & Mochizuki, Y. "Curing effects on geotechnical properties of clays treated with palm kernel shell ash and rice husk ash: Insights from water absorption characteristics of stabilizers." *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, 2024, e02947. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e02947
- [4] Ormeno, E., Rivas, N., Duran, G., & Soto, M. (2024). *Stabilization of a Subgrade Composed by Low Plasticity Clay with Rice Husk Ash*. doi: 10.1088/1757-899X/758/1/012041 .
- [5] Hidalgo, F., Saavedra, J., Fernandez, C., & Duran, G. (2024). *Stabilization of clayey soil for subgrade using rice husk ash (RHA) and sugarcane bagasse ash (SCBA)*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 758(1), 012041. doi: 10.1088/1757-899X/758/1/012041.
- [6] Vizcarra, S., Lujan, I., Soto, M., & Durán, G. (2024). *Experimental analysis of the addition of rice husk ash to the clayey subgrade of a road stabilized with lime*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 758(1), 012090. doi: 10.1088/1757-899X/758/1/012090.
- [7] Tiwari, R., & Maharjan, M. (2021). Performance of clayey soil stabilized with rice husk ash and lime. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3329–3335. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.384>
- [8] Umar, M., Nwaiwu, C. M., & Mohammed, U. A. (2021). Stabilization of expansive clay soils using lime and rice husk ash: Experimental and modeling approach. *SN Applied Sciences*, 3(3), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04255-4>
- [9] Adebisi, N. O., Jimoh, A. A., & Faweya, E. B. (2020). Engineering properties of stabilized lateritic soil with rice husk ash and lime for construction purposes. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32(8), 587-593. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.11.003>
- [10] Prasad, D. S., & Sahoo, A. K. (2022). Eco-friendly stabilization of weak subgrade soils using rice husk ash and lime. *Cleaner Materials*, 3, 100046. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100046>
- [11] ASTM International. (2017). ASTM D1557: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. ASTM International.
- [12] ASTM International. (2017). ASTM D2166: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International.
- [13] ASTM International. (2017). ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International.
- [14] ASTM International. (1999). ASTM D6276-99a: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. ASTM International.
- [15] Rao, G. V., Subramaniam, K. V. L., & Natarajan, C. (2017). Performance of rice husk ash and lime in stabilizing clay soils. *Construction and Building Materials*, 157, 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.070>