

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**USO DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ COMO
ALTERNATIVA PARA EL MEJORAMIENTO DE SUBRASANTES
ARCILLOSAS EN PAVIMENTOS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLERA EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORAS:

ACUÑA SUPO STEPHANI MILENA

LIENDO LUQUE CAROL ESTEFANI

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORES:

LAVADO SÁNCHEZ KEVIN MICHELL

CUSINGA VARGAS GIANCARLO

CASTRO MARCHÁN SERGIO RODRIGO

ASESORA:

SOTO DUEÑAS MILAGROS DEL PILAR

LIMA, DICIEMBRE, 2020

RESUMEN

La construcción de pavimentos a lo largo del país es un proceso complejo que varía dependiendo del lugar. Una variable muy importante es la subrasante, que es el terreno natural, donde se apoya el pavimento, esta debe ser aceptable para soportarlo. La medida de resistencia de la subrasante es el California Bearing Ratio (CBR) la cual debe ser mayor al 6% para considerarse adecuada. Existen zonas en el país donde la subrasante no es adecuada y es necesaria una estabilización, pero se busca otra alternativa más económica y que afecte menos al medioambiente. Un nuevo material ha surgido estos últimos años, que tiene propiedades similares a las del cemento. Es aquí donde se presenta la ceniza de cáscara de arroz que es un producto de la quema de la cáscara de arroz, la cual el día de hoy es considerado un residuo de la producción de arroz. En esta investigación se listan y comparan diversas investigaciones hechas por distintos ingenieros en el país que muestran cómo la ceniza de cáscara de arroz ayuda a mejorar las propiedades mecánicas de las subrasantes arcillosas que presentan un pobre desempeño. Adicionalmente, se hace una comparación económica y de emisiones con otros métodos de estabilización, esto para poder tener una comparación más completa de las ventajas que puede tener esta alternativa frente a las más comunes.

Se demuestra que los resultados de la ceniza de cáscara de arroz mezclada con el suelo de la subrasante arcillosa logran aumentar el CBR a valores mayores al 6% mejorando sus propiedades mecánicas. Por otro lado, se ve que es una alternativa económica comparando con la cal y el cemento, que son los métodos más comunes, además, genera menos emisiones que la producción del cemento. En general, se observa que la ceniza de cáscara de arroz es una alternativa viable que debe tener una mayor difusión en zonas donde existe una gran producción de arroz, tales como Lambayeque y algunas regiones tropicales del país. A partir de la difusión, se debe proceder a buscar empresas que puedan contribuir con la quema para la obtención del material mencionado, todo esto con la finalidad de que este sea un proceso

controlado. Si se logran completar estos dos pasos se puede dar pie a una nueva alternativa para el mejoramiento de suelos y a su vez mejorar esta misma alternativa con el desarrollo de nuevas tecnologías contribuyendo a la ciencia y a la elaboración de caminos en el Perú.



ÍNDICE

1.	Introducción	1
1.1.	Pregunta de investigación	1
1.2.	Objetivos	1
1.3.	Hipótesis	1
1.4.	Justificación	2
1.5.	Alcances y Limitaciones	3
1.6.	Metodología de investigación	3
2.	Revisión bibliográfica	4
2.1.	Pavimentos	4
2.2.	Clasificación de subrasantes	5
2.3.	Alternativas de mejoramiento para subrasantes	8
2.3.1.	Caucho triturado	9
2.3.2.	Tiras de plástico PET	9
2.3.3.	Estabilización mecánica con material granular	10
2.3.4.	Estabilización química	10
2.4.	Antecedentes y situación actual de la producción y cultivo de arroz	11
2.4.1.	Características para el cultivo de arroz	11
2.4.2.	Producción de arroz mundialmente	11
2.4.3.	Situación actual del cultivo y producción de arroz en el Perú	14
2.5.	Generalidades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz	15
2.6.	Ceniza de cascarilla de arroz como alternativa de mejoramiento de subrasantes	17
3.	Propiedades Mecánicas	18
3.1.	California Bearing Ratio (CBR)	18
3.2.	Resistencia a la Compresión no confinada	19
3.3.	Ensayo Proctor	19
4.	Análisis de Costos de las alternativas	19
5.	Análisis ambiental	21
6.	Resultados	22
6.1.	Resultados de los ensayos de propiedades mecánicas	22
6.1.1.	Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo	22
6.1.2.	Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016	26
6.1.3.	Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv. San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018	32

6.1.4.	Estabilización de suelos arcilloso con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante	36
6.1.5.	Resumen de las investigaciones analizadas	40
6.2.	Resultados del estudio económico realizado	42
6.3.	Resultados del estudio ambiental	44
7.	Discusión de Resultados	45
7.1.	Discusión de los ensayos de propiedades mecánicas	45
7.2.	Discusión del estudio económico realizado	46
7.3.	Discusión del estudio ambiental	47
8.	Conclusiones	47
9.	Bibliografía	50



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de suelos AASHTO	6
Tabla 2. Clasificación de Subrasantes según el índice de grupo	7
Tabla 3. Categorías de Subrasantes según su CBR	8
Tabla 4. Requisitos para estabilizar suelos	20
Tabla 5. Costo de producción del arroz en el Perú	21
Tabla 6. Resultados del análisis granulométrico de las muestras	23
Tabla 7. Resultados de límites de Atterberg para las combinaciones de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz	23
Tabla 8. Resultados de ensayos de compactación para las combinaciones de suelos	24
Tabla 9. Resultados de Valores de CBR de las combinaciones de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz.	26
Tabla 10. Resultados de análisis granulométrico para cada combinación de suelo arcilloso y un porcentaje de CCA.	27
Tabla 11. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de plasticidad	28
Tabla 12. Resultados de Proctor Modificado, Valores de contenido de humedad óptima y máxima densidad seca	28
Tabla 13. Resultados de CBR con 0% de CCA	30
Tabla 14- Resultado de CBR con 7% de CCA.	31
Tabla 15. Resultados de CBR para cada % de CCA	31
Tabla 16. Análisis Granulométrico del suelo	32
Tabla 17. Límites de Atterberg	33
Tabla 18. Combinaciones de mezcla de suelo con CCA	33
Tabla 19 Resultados de Ensayo de Proctor Modificado	34
Tabla 20. Resultados de CBR para las mezclas de suelo	36
Tabla 21. Proporción de combinación de los materiales sus símbolos para las combinaciones de suelo arcilloso y CCA.	37
Tabla 22. Ensayo de compactación para las combinaciones de suelo	37
Tabla 23. Resultados de Valores de CBR de las combinaciones de suelo arcilloso y CCA	39
Tabla 24. Resumen de los resultados de las investigaciones	40
Tabla 25. Costos de la CCA por kilogramo	42
Tabla 26. Costos de la cal por kilogramo	43
Tabla 27. Costos del cemento por kilogramo	43
Tabla 28. Costos parciales aproximados del uso de CCA, cal y cemento.	44
Tabla 29. Porcentajes de ahorro	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de hectáreas del cultivo de arroz.	12
Figura 2. Principales países productores de arroz.	13
Figura 3. Gráfico comparativo de costos de productos de necesidad básica.	14
Figura 4. Composición química y propiedades físicas de diferentes cenizas de cáscara de arroz.	16
Figura 5. Curva de condiciones óptimas de incineración para obtener una CCA.	17
Figura 6. Ceniza de cáscara de arroz.	18
Figura 7. Óptimo contenido de humedad vs % de CCA.	25
Figura 8. Máxima densidad seca vs % de CCA.	25
Figura 9. Granulometría del suelo empleado.	27
Figura 10. Óptimo contenido de humedad vs % de CCA.	29
Figura 11. Máxima densidad seca vs % de CCA.	30
Figura 12. Óptimo contenido de humedad vs % de CCA.	35
Figura 13. Máxima densidad seca vs % de CCA.	35
Figura 14. Máxima densidad seca vs % de CCA.	38
Figura 15. Máxima densidad seca vs % de CCA.	39
Figura 16. Análisis de los valores de Humedad Óptima con respecto al % incluido de CCA de las investigaciones correspondientes.	41
Figura 17. Análisis de los valores de máxima densidad seca con respecto al % incluido de CCA de las investigaciones correspondientes.	41
Figura 18. Análisis de los valores de CBR con respecto al % incluido de CCA de las investigaciones correspondientes.	42
Figura 19. Emisiones de la producción de arroz y cemento.	44

1. Introducción

1.1. Pregunta de investigación

¿La ceniza de cáscara de arroz resulta viable como una alternativa para el mejoramiento en la estabilidad de las subrasantes arcillosas?

1.2. Objetivos

Objetivo Principal: Determinar los beneficios mecánicos de la ceniza de cáscara de arroz para la estabilización de la subrasante arcillosa en pavimentos.

Objetivos secundarios:

- Verificar el mejoramiento en las propiedades mecánicas de las subrasantes arcillosas por medio de cálculos y ensayos existentes.
- Determinar y comparar el costo de la ceniza de cáscara de arroz con respecto a otras alternativas.
- Analizar superficialmente la magnitud del impacto ambiental del uso de la ceniza de cáscara de arroz.

1.3. Hipótesis

La ceniza de cáscara de arroz provee una mejora en las propiedades mecánicas de las subrasantes arcillosas y resulta económicamente más conveniente que otras alternativas. El comportamiento de la ceniza de cáscara de arroz sería como el de un cemento.

1.4. Justificación

En la actualidad en el Perú se cuentan con grandes proyectos de carreteras, de los cuales muchos presentan un suelo arcilloso que requieren un tratamiento mediante la estabilización de su subrasante con la finalidad de que sea capaz de tener un buen comportamiento para poder soportar las cargas estructurales. Para esta mejora existen diversos métodos tradicionales que son ampliamente utilizados en el país. Sin embargo, en determinadas zonas del país no se cuenta con la materia prima para la estabilización de subrasantes; o no es económicamente viable, lo cual eleva el costo general de los proyectos debido a su transporte.

Se busca una alternativa a estos métodos en zonas productoras de arroz que presenten un suelo arcilloso. Por esta razón se presenta la ceniza de cáscara de arroz como un método alternativo para la mejora de la subrasante arcillosa en dichas zonas del país. La alta producción de arroz genera grandes residuos que se busca ser aprovechado con este método alternativo de estabilización y para disminuir la contaminación que producen otras formas de estabilización de material cohesivo.

Por lo tanto, la presente investigación muestra que la ceniza de cáscara de arroz es un material con un gran aporte para la mejora de la subrasante arcillosa dentro del territorio nacional. Se muestran los resultados de sus beneficios mecánicos en la subrasante mediante ciertos parámetros, como el valor de su California Bearing Ratio (CBR), el cual es uno de los parámetros más usados para valores de resistencia en cuanto a pavimentos. Así como también la mejora de los valores correspondientes a los límites de Atterberg, la densidad máxima seca, que es determinada a partir del ensayo Proctor estándar y modificado, y la humedad óptima.

La presente investigación busca incentivar el uso de una alternativa más para la estabilización de subrasantes arcillosas mediante la inclusión de la ceniza de cáscara de arroz, por lo cual se presenta una suma de resultados de otras investigaciones ya que no se cuenta con ensayos propios.

1.5. Alcances y Limitaciones

El alcance del presente trabajo de investigación está enfocado en las zonas del Perú con subrasantes arcillosas y de mayor producción de arroz. Esta investigación recopilará fuentes primarias de información que se asumirán como verídicas y que reflejan correctamente los resultados obtenidos. Debido al panorama global actual, queda descartada cualquier extracción de muestras de subrasantes y los ensayos experimentales en laboratorio de suelos. Se busca realizar una comparación entre estos resultados para poder ver cuánto sería el aumento en el valor de CBR que se genera y, además, el porcentaje de ceniza que se emplea para la muestra de suelo. Se debe resaltar que las investigaciones han sido realizadas en distintos lugares del país, pero se tiene en común que todas son para subrasantes arcillosas, que es el principal foco de esta investigación.

1.6. Metodología de investigación

Dentro de los métodos y procedimientos a utilizar para la investigación se considera:

- Recopilación de datos de diversas fuentes, las cuales deben ser confiables, presentar calidad en su presentación y coherencia en sus procedimientos y resultados. Adicionalmente, se toman en cuenta fuentes recientemente publicadas para obtener información actualizada.
- Interpretación y comparación de los resultados de fuentes secundarias. Principalmente, en cuanto a resistencia del material sin modificar y

modificado, se toma en cuenta los parámetros indicadores de propiedades mecánicas principalmente el CBR.

- Investigación de datos adicionales que complementen los resultados hallados y su subsecuente elaboración.
- Elaboración de conclusiones, recomendaciones y posibles aplicaciones en contextos similares.

2. Revisión bibliográfica

2.1. Pavimentos

Los pavimentos son estructuras compuestas por varias capas que son responsables de resistir y distribuir los esfuerzos recibidos por los vehículos durante su uso; así mismo, las capas que lo constituyen son la carpeta de rodadura, la base y la sub base (MTC, 2013). Sus características de cada una son las siguientes, según el “Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos”, por el manual del MTC (2013):

- **Capa de rodadura:** es la capa superior del pavimento, expuesta directamente al tránsito, puede ser rígida o flexible, depende del material con la cual se elaboró. Puede estar hecha por Cemento Portland (rígido) o asfalto (flexible).
- **Base:** es la capa que se encuentra debajo de la capa de rodadura; así mismo es la responsable de recibir, sostener y distribuir los esfuerzos. Debe estar hecha con una grava drenante con un $CBR > 80\%$.

- **Subbase:** la capa que se encuentra directamente debajo de la base, sirve como capa de drenaje y ayuda a controlar la capilaridad, dependiendo del diseño puede obviarse. Está hecha por material granular con un CBR > 40%.

2.2. Clasificación de subrasantes

La subrasante es el nivel del suelo donde va a estar apoyada la estructura del pavimento que debe ser lo suficientemente resistente para poder soportar las cargas incluidas las del tránsito; por ello, se clasifica y asegura que la subrasante sea adecuada para los parámetros de diseño (MTC, 2013).

De acuerdo con el MTC en el “Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” se puede clasificar la subrasante empleando una tabla y conociendo el valor del CBR (California Bearing Ratio). Aparte de la clasificación de subrasante, también, se puede clasificar el suelo utilizando la metodología AASHTO, donde la más actual es del año 2015. En la Tabla 1 se muestra la descripción de cada uno de los grupos según su clasificación, como se muestra a continuación:

Tabla 1

Clasificación de suelos de la AASHTO.

TABLE 2 Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures

General Classification	Granular Materials 35 % or Less Passing 75 µm (No. 200)							Silt-Clay Materials More Than 35 % Passing 75 µm (No. 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Sieve analysis, % passing:											
2.00 mm (No. 10)	50 max	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
425 µm (No. 40)	30 max	50 max	51 min	...	...	...	...	...	...	...	...
75 µm (No. 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Characteristics of fraction passing 425 µm (No. 40):											
Liquid Limit	...	...	...	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity Index	6 max	...	N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min ^A
Usual types of significant constituent materials	Stone Fragments, Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
General rating as subgrade	Excellent to Good							Fair to Poor			

^APlasticity index of A-7-5 subgroup is equal to or less than LL minus 30. Plasticity index of A-7-6 subgroup is greater than LL minus 30 (see Fig. 1).
Reprinted with permission of American Association of State Highway and Transportation Officials.

Nota. Tomado de “Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes”, por ASTM Internacional, 2015.

La clasificación está dividida en 7 grupos principales que van desde el 1 al 7, acompañadas de la letra A. Como se puede ver en la Tabla 1, las subrasantes que tienen una clasificación A-1 y A-2 son las subrasantes óptimas para la construcción de pavimentos. Finalmente, las clasificaciones A-4, A-5, A-6, A-7 son para suelos no tan aceptables para los pavimentos, en especial los A-6 y A-7 que son suelos arcillosos.

Además de emplear la simbología de A-#, se le agrega un número adicional llamado “Índice de grupo” (IG) que tiene la siguiente fórmula:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + [0.01(F - 15)(IP - 10)]$$

Donde:

F: Fracción que pasa la malla #200, expresado como número entero

LL: Límite Líquido

IP: Índice de plasticidad

Para este parámetro se toman algunas consideraciones en cuanto al suelo y al valor obtenido. El índice de grupo debe ser un número entero positivo, si se obtiene un valor negativo entonces se considera 0. Si el suelo es no plástico entonces el índice de grupo se considera 0. Finalmente, si se obtiene un valor con decimales, este se redondea al entero más cercano. (AASHTO, 2015). Por otro lado, El MTC emplea la siguiente tabla, donde se clasifican subrasantes según su índice de grupo:

Tabla 2

Clasificación de subrasantes según índice de grupo.

Índice de Grupo	Suelo de Subrasante
IG > 9	Muy Pobre
IG está entre 4 a 9	Pobre
IG está entre 2 a 4	Regular
IG está entre 1 – 2	Bueno
IG está entre 0 – 1	Muy Bueno

Nota. Tomado de “Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos”, por MTC, 2013.

Se encuentran 5 tipos de suelo de subrasante distintas en la Tabla 2 que va desde *Muy Bueno* hasta *Muy Pobre*. La clasificación de subrasantes emplea el valor de CBR, el cual brinda un parámetro de resistencia relativa del suelo usado para pavimentos. Para determinar el CBR se debe realizar un ensayo al suelo encontrado en el terreno. Este valor se mide en porcentaje y de acuerdo con esto se da la clasificación, se emplea la siguiente tabla (MTC, 2013).

Tabla 3

Categorías de subrasantes de acuerdo a su CBR.

Categorías de Subrasante	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

Nota. Tomado de “Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos”, por MTC, 2013.

A diferencia del IG, la clasificación con CBR es la que toma en cuenta la resistencia del suelo en estudio. Esta clasificación es la más utilizada para los proyectos de infraestructura vial. Según el manual del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), las subrasantes con un CBR < 6 deben ser estabilizadas o las cuales están en zonas húmedas o blandas.

2.3. Alternativas de mejoramiento para subrasantes

En lo que respecta a carreteras y subrasantes, siempre ha existido la problemática de falta de material de relleno para subrasantes en zonas que simplemente no cuentan con material granular en su suelo. Por lo tanto, siempre se ha buscado tecnologías de mejoramiento del material que compone a una subrasante tradicional en zonas de suelos cohesivos. Para que sea necesario estabilizar un suelo debe de tener ciertas características, la primera y usualmente más común es el valor de CBR < 6%, lo cual clasifica a la subrasante como pobre o no adecuada. Otra característica es si se presenta arcilla o limo como capa de subrasante y al humedecerse puedan contaminar la base. Las últimas dos

características son acerca de la napa freática, su profundidad a la que se encuentra varía dependiendo de la calidad de subrasante que si es inadecuada debe estar a 1.20 m de profundidad, y la altitud a la que se encuentra la carretera donde también tiene que ver la profundidad de la napa freática que afectaría a suelos mediante el congelamiento (MTC, 2013). En lo que corresponde a algunos materiales cuyo uso ha comenzado recientemente se pueden resaltar los siguientes:

2.3.1. Caucho triturado

El caucho es un polímero elástico de origen orgánico, obtenido de un compuesto del látex que segregan los árboles como savia en zonas tropicales como en la Amazonía peruana. Las propiedades elásticas de este compuesto se utilizan, como es de conocimiento general, en la fabricación de neumáticos, calzado, herramientas, etc. Y de una manera más particular el caucho, dentro del área de ingeniería, se utiliza en forma de neopreno, el cual es un ingrediente en la fabricación de aisladores sísmicos (Legner, s.f.).

Para el caso de estabilización de material cohesivo, el material se ha evaluado en la tesis de la bachiller de ingeniería civil Ximena García (2019) con una muestra de 90% material arcilloso cohesivo y 10% de caucho triturado. Como resultado de este ensayo se determina que el compuesto presenta un desempeño inferior al esperado en cuanto a propiedades cohesivas y estabilizantes en muros de tierra.

2.3.2. Tiras de plástico PET

El tereftalato de polietileno es un polímero sintético resultado de la reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y etilenglicol (Quinteros, 2016). Este compuesto tiene un amplio rango de usos en la industria actual, desde la elaboración de

diferentes fibras sintéticas en la industria textil hasta envases en la industria alimentaria, particularmente en la fabricación de botellas.

En lo que corresponde a los ensayos para muestra con el propósito de usarse en muros de tierra, el compuesto de 98% suelo arcilloso y 2% fibras de PET (García, 2019) demuestra una mejora en las capacidades cohesivas con respecto al material sin tratamiento, y, por lo tanto, la estabilidad del talud que se evaluó en el proyecto de investigación. Sin embargo, queda por determinar más a fondo si las capacidades en el caso de subrasantes y resistencia por desplazamientos laterales se traduce correctamente en su aplicación a subrasantes.

Y en lo que respecta a métodos de mejoramiento que se han usado por más tiempo y más frecuentes se pueden destacar los siguientes:

2.3.3. Estabilización mecánica con material granular

Se mejora el material base, como el caso de la arcilla o posiblemente arena de baja capacidad portante y un valor muy bajo de CBR para subrasante, adicionando material de una granulometría diferente, usualmente grava mal gradada, que aumente su máxima densidad y mejore su resistencia reflejado en el CBR. Esta mezcla se compacta a la densidad necesaria y de ser necesario se le puede adicionar un tratamiento químico.

2.3.4. Estabilización química

Para este tipo de mejoramiento químico se añade cemento, puzolana o ceniza volante y óxido de calcio o cal al material base en una proporción previamente determinada. Esto con el objetivo de formar fibras de silicato de calcio que presentan un efecto de tratamiento entre sus partículas que mejora la integridad del material; seguida de la reacción del cemento con la puzolana que en general aumenta la resistencia de todo

el compuesto. Esta forma de mejoramiento por lo general se usa en suelos de bajo CBR granulares, en suelos cohesivos puede que el efecto no sea tan favorable (Álvarez, 2015).

2.4. Antecedentes y situación actual de la producción y cultivo de arroz

2.4.1. Características para el cultivo de arroz

Los ambientes húmedos son característicos para el cultivo del arroz, estos son producidos principalmente en climas tropicales y subtropicales (InfoAgro, 2020). Además, el arroz puede cultivarse en una distinta variedad de suelos con texturas diferentes desde arenosa hasta arcillosa (InfoAgro, 2020). Por otro lado, para el cultivo de arroz se requiere una gran cantidad de mano de obra además de demanda de agua a diferencia de otros cereales, sin embargo, es considerado un alimento básico que abastece a más de la mitad de la población mundial (FAO, 2000).

2.4.2. Producción de arroz mundialmente

En el año 2014 la producción mundial de arroz con respecto a un año anterior tuvo un incremento de 0.92 millones que representa el 0.19% (Statista, 2020). Sin embargo; a lo largo de los años la producción del arroz a nivel mundial ha ido incrementado y, como consecuencia, el área de cultivo de arroz. La Figura 1 muestra estadísticamente la evolución de las hectáreas (en millones) utilizadas en el cultivo de arroz en un periodo de 2015 al 2018.



Figura 1. Evolución de hectáreas del cultivo de arroz.

Tomado de Statista (2020) Agricultura: Superficie de cultivo de arroz a nivel mundial de 2015 a 2018.

Con respecto a las proyecciones que se realizaron; en febrero del 2020 la Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura anticipó que el 2020 y 2021 la producción de arroz alcanzaría 510 millones de toneladas con un incremento anual de 1.5% (FAO, 2020). A pesar de que los principales productores de arroz están en los países de la India, China, Indonesia y Bangladesh, Perú se encuentra entre los 15 países con gran producción de arroz a nivel mundial como se muestra a continuación en valores porcentuales con respecto a la producción total.

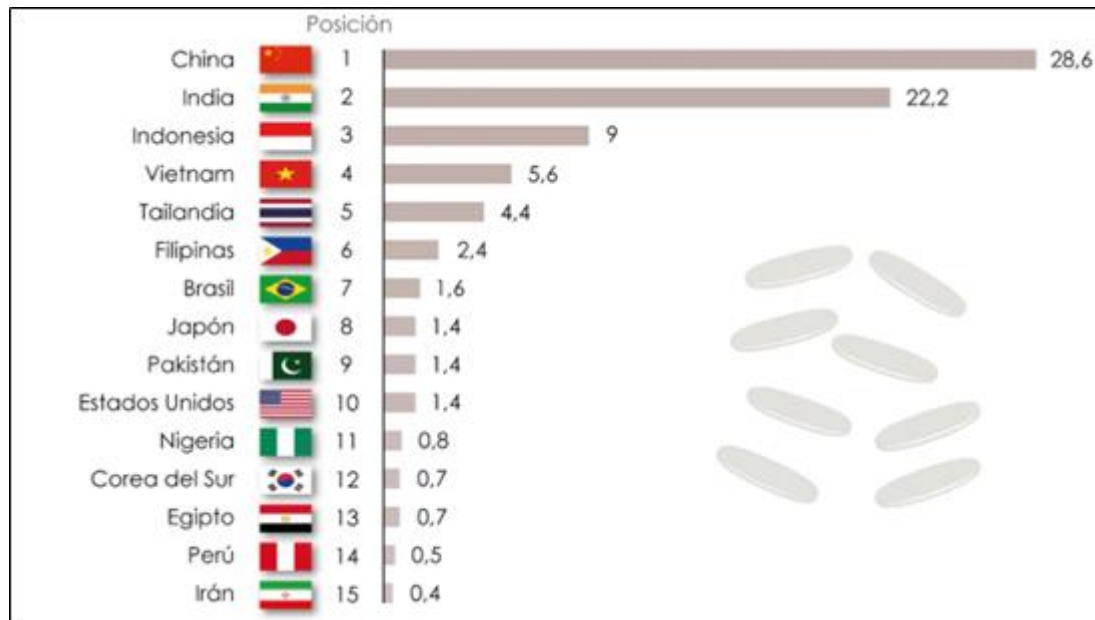


Figura 2. Principales países productores de arroz.

Tomado de OCDE (2019) Principales países productores de arroz.

Por otro lado, según las perspectivas agrícolas hasta el 2020 se observa una tendencia de incremento de precios del arroz y otros tipos de cereales. Adicionalmente, se observa que, con respecto a otros tipos de productos, el arroz es uno de los más altos costos, esto muestra que los precios se rigen más al mercado, demanda y volatilidad de precios a nivel mundial debido a que pertenece a los productos básicos de alimentación. A continuación, se muestra la Figura 3 que representa lo antes mencionado:

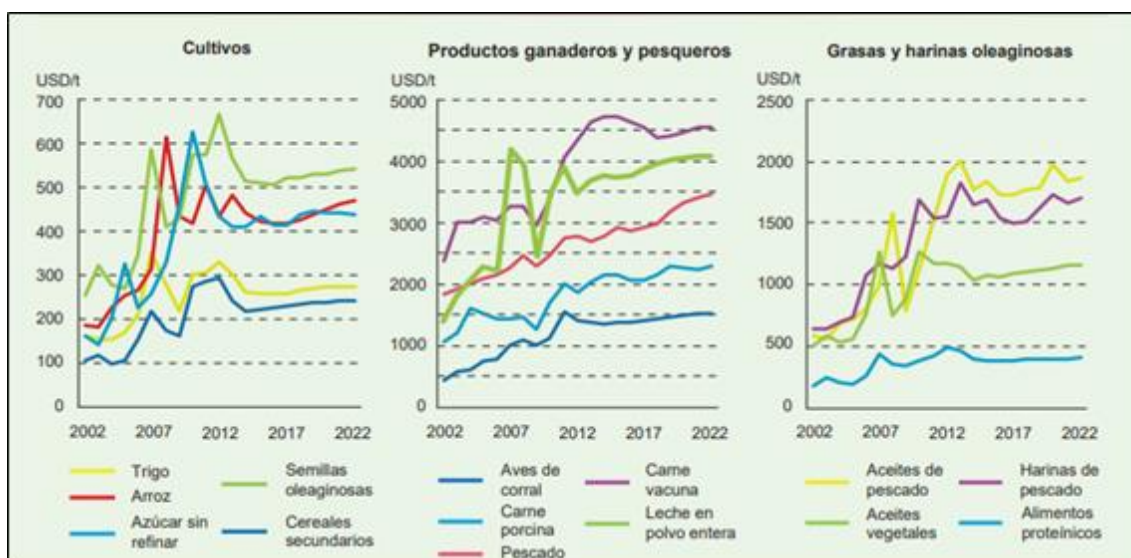


Figura 3. Gráfico comparativo de costos de productos de necesidad básica.

Tomado de OSDE-FAO (2020) Costos de productos de necesidad básica.

2.4.3. Situación actual del cultivo y producción de arroz en el Perú

La situación en la que se encuentra la producción del arroz en Perú, es que este aporta, además de la papa, en gran magnitud al VBP agrícola y un 6% del PBI agropecuario del Perú, además de contar la mayor área de cultivo y de productores (MINAG,2010). Según el Ministerio de Agricultura y Riego Existen 100.000 productores de arroz y 600 molinos en el Perú, donde la mayoría de estos se encuentran en el departamento de Lambayeque (MINAG,2010). Debido a que en el Perú, al igual que en todo el mundo, el mayor área de cultivo es del arroz, la producción de la cáscara de arroz incremento para el 2019 en 23.1% en el marzo con respecto a las estadísticas del 2018, esto adicionalmente se debió a las condiciones térmicas e hídricas favorables, según el informe técnico que muestra un panorama económico departamental del Perú (INEI, 2019).

Por otro lado, con respecto a la producción y cultivo del arroz y la alta demanda de la mano obra para el cultivo de este, existen departamento en el Perú como San Martín que tiene como principal actividad económica el cultivo del arroz ya que el 70% de la

PEA se dedica a esta actividad (MINAG,2010). Entre los departamentos con mayor producción de arroz está Lambayeque, ya que posee la mayor cantidad de molinos. Sin embargo, a pesar de que existen molineras en Jaén-Bagua y San Martín, los productores prefieren hacer uso de los molinos encontrados en Lambayeque debido a que tiene un servicio de secado solar, procesamiento y comercialización (MINAG,2010). Sin embargo, Perú también importa arroz, principalmente de Uruguay, Bolivia y otros países latinos, con porcentajes de importación de 88.5%,9.4% y 2.1% respectivamente (MINAG,2010).

2.5. Generalidades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz

La cáscara de arroz es un material de desecho agrícola que constituye alrededor de 20% de la producción mundial de arroz. Uno de los subproductos agrícolas que se puede producir es la ceniza de la cáscara de arroz (CCA). Entre las características especiales de la CCA está el alto contenido de sílice, lo que la convierte en un material puzolánico. Es esta sílice que se le adiciona a los cultivos de arroz porque cumple un rol importante en su correcto crecimiento y producción en general, por lo que este material se encuentra repartido en toda la planta, donde particularmente nos enfocamos en el contenido presente en la cascarilla. En la Figura 4 se comparan características químicas y físicas de 5 diferentes CCA, donde resalta su elevado porcentaje de sílice (hasta un 97%) (Xinyu, 2015).

Ceniza de cáscara de arroz	1	2	3	4	5
SiO ₂ (%)	92.40	94.60	87.86	91.71	86.98
Al ₂ O ₃ (%)	0.30	0.30	0.68	0.36	0.84
Fe ₂ O ₃ (%)	0.40	0.30	0.93	0.90	0.73
CaO (%)	0.70	0.40	1.30	0.86	1.40
MgO (%)	0.30	0.30	0.35	0.31	0.57
Na ₂ O (%)	0.07	0.20	0.12	0.12	2.46
K ₂ O (%)	2.54	1.30	2.37	1.67	–
Pérdida por ignición	2.31	1.80	–	3.13	5.14
Gravedad específica (g/cm ³)	2.10	2.05	–	–	2.10
Finura menor a 45 μm (%)	–	98.20	–	–	–
Tamaño medio de partícula (μm)	7.40	7.15	–	0.15	7.40

Figura 4. Composición química y propiedades físicas de diferentes cenizas de cáscara de arroz. Tomado de “A review on recent advances in the comprehensive application of rice husk ash”, por Xinyu, L, 2015.

Las cenizas son utilizables para la estabilización, tanto mecánica como química de los suelos. En la estabilización mecánica, por su granulometría fina permiten rellenar los huecos entre los granos más gruesos que componen las arenas y los sedimentos lo que conlleva a un mejoramiento de su resistencia a la compresión; mientras que, en la estabilización química, su alto contenido de sílice la convierte en un material cementante (Alvarado & Guerra, 2018).

La CCA se obtiene de la combustión controlada de cáscara de arroz. Este proceso de la combustión quita la materia orgánica y deja el residuo rico en sílice; sin embargo, en función de la temperatura y duración que se produce la quema se puede obtener una estructura amorfa con alta actividad puzolánica, o cristalina con baja actividad puzolánica. (Llamoga, 2017). La Figura muestra las temperaturas y tiempos necesarios para obtener una CCA microporosa y con estructura celular. La superficie comprendida entre las curvas encierra las condiciones óptimas. Por el contrario, la ceniza producida a

temperaturas entre 550 y 700 °C durante una hora de incineración transforma la sílice en fase amorfa.

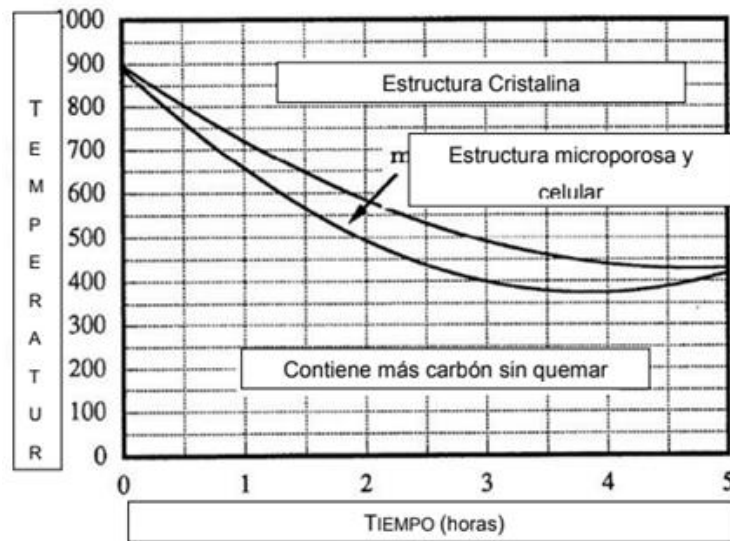


Figura 5. Curva de condiciones óptimas de incineración para obtener una CCA.

Tomado de "Evaluación de las emisiones de carbono del cemento Portland compuesto con ceniza de cáscara de arroz durante el proceso de fabricación" por Higaldo, P, 2015.

2.6. Ceniza de cascarilla de arroz como alternativa de mejoramiento de subrasantes

Como se exploró en el acápite anterior, el silicio presente en la CCA presenta propiedades estabilizantes y demuestra un efecto cementante en las partículas de suelos granulares y cohesivos que en general mejora su capacidad portante, resistencia, rigidez ante desplazamientos laterales.

En lo que respecta al área de transporte y construcción de carreteras, las características mencionadas describen apropiadamente los requisitos que debería cumplir el perfil de suelo de la subrasante de una carretera que deba soportar grandes cargas de gravedad móviles fuertes. Y particularmente en el caso de pavimentos flexibles, la subrasante debe tener un valor de rigidez apropiado para que no existan deflexiones

considerables en la subrasante que puedan generar problemas en su funcionalidad como suele suceder en las vías de la red nacional (Aizpurúa, s.f.).



Figura 6. Ceniza de cáscara de arroz.

Tomado de “Estudio del concreto de alta resistencia con el uso de cenizas de materiales orgánicos y polímeros” por Aizpurúa, Lidia. (s.f.)

3. Propiedades Mecánicas

3.1. California Bearing Ratio (CBR)

El California Bearing Ratio es el principal parámetro utilizado para el diseño de pavimentos, en el cual se obtiene una resistencia relativa de la subrasante o base que se ensaya. Para hallar este valor se realiza el ensayo con el mismo nombre. Este ensayo consiste en la penetración de un pistón de aproximadamente 50 mm de diámetro sobre un molde cilíndrico a una velocidad estándar. Finalmente, el valor de CBR se obtiene al dividir la carga obtenida del ensayo sobre una carga estándar y luego, multiplicarla por 100 para obtener el porcentaje. La carga estándar varía dependiendo del diámetro de penetración que puede ser de 0.1 pulgadas o 0.2 pulgadas. (AASHTO Designation T 193, 1999)

3.2. Resistencia a la Compresión no confinada

Este ensayo permite determinar la resistencia a la compresión de una muestra de suelo cilíndrica de una manera rápida y, además, permite hallar indirectamente la cohesión para un suelo cohesivo. El procedimiento consiste en ensayar una muestra cilíndrica de suelo a través de una prensa que le genera esfuerzos verticales y debido a ello se puede hallar la resistencia de manera rápida (ASTM D2166-06).

3.3. Ensayo Proctor

Para poder construir un terraplén es necesario la compactación de las capas con su humedad óptima. El ensayo que permite obtener la humedad óptima relacionado con la densidad es el ensayo Proctor, que puede ser estándar o modificado. El procedimiento del ensayo consiste en la construcción de capas de suelo dentro de un molde de dimensiones de 101.6 mm (4") o 152.4 mm (6") para el diámetro, cada ensayo tiene una determinada humedad. El suelo se coloca por capas, tres para el estándar y 5 para el modificado, y se compacta con un determinado número de golpes provenientes de un martillo normado. Al variar la humedad con la compactación del martillo que permite llegar a una cierta densidad se construye la curva densidad relativa vs. humedad donde en el máximo de ella se encuentra la humedad óptima para la muestra de suelo. (ASTM D698 - 12e2) (ASTM D1557 - 12e1)

4. Análisis de Costos de las alternativas

Según lo establecido por el MTC, si el suelo de la subrasante es cohesivo se proponen métodos de estabilización, con algunas restricciones, según la siguiente tabla:

Tabla 4

Requisitos para estabilización de suelos.

3	CH ó CL ó MH ó ML ó OH ó OL ó ML-CL	(1)	Cemento Portland	LL no menor de 40 IP no menor de 20	Suelos orgánicos y fuertemente ácidos contenidos en esta área no son susceptibles a la estabilización por métodos ordinarios
		(2)	Cal	IP no menor de 12	

Nota. Tomado de “Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos”, por MTC, 2013.

Se realiza un análisis de costos de las dos alternativas planteadas por el MTC en el “Manual de Carreteras. Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”, comparándolas con la nueva alternativa planteada que es la de CCA. Y las dos principales son las siguientes:

- Cal: La cal puede estabilizar permanentemente el suelo fino empleado como una subrasante, para crear una capa con un valor estructural significativo en el sistema del pavimento. Los suelos tratados pueden ser del lugar (subrasante) o bien, de materiales de préstamo. La estabilización de la subrasante por lo general implica mezcla en el lugar y generalmente requiere la adición de cal de 3 a 7 % en peso del suelo seco (National Lime Association, 2004).

Tipos de Cal utilizables para el reforzamiento y estabilización de suelos:

- Cal aérea cálcica (CL)
- Hidratada en polvo (CL 90-S) y pasta (CL 90-S PL)
- Cal hidráulica natural (NHL), Cal hidráulica natural 2 (NHL 2), Tipo (NHL 3.5), Tipo (NHL 5)

Sin embargo, para estabilización de vías, particularmente, se recomienda el uso de cal aérea viva del tipo CL 90-Q o cal aérea hidratada del tipo CL 90-S.

- Cemento: En principio cualquier cemento puede utilizarse en la estabilización de suelos, sin embargo, mayormente se emplea el TIPO I, además es el que permite

a la mezcla de suelo-cemento alcanzar mayor resistencia por su contenido de aluminato tricálcico y sulfato de calcio. La cantidad de cemento puede variar entre el 2 y 25 % del peso seco de la mezcla. El promedio es del 10 % y se procura que no pase del 15% por motivos económicos (Álvarez, 2016).

En contraste, acerca de la producción del arroz, la cáscara de arroz y la ceniza que sale a partir de ella. A continuación, se presenta una tabla que indica los costos unitarios por kg de la producción de arroz en el Perú.

Tabla 5

Costo de producción de arroz en el Perú

COSTO DE PRODUCCIÓN DE ARROZ EN PERÚ						
RUBRO	Volumenes y Precios	ZONA PRODUCTORA				
		Piura	Lambayeque	La Libertad*	Arequipa*	San Martin
COSTOS	Directos	4.211,50	4.493,63	5.941,83	6.075,13	3.435,50
	Indirectos *	1.179,23	1.258,22	397,63	397,63	1006,91
COSTO TOTAL	Soles / Ha	5.390,73	5.751.85	6.339,46	6.472,761	4.442,41
	Soles / Kg	0,72	0,68	0,75	0,72	0,68
	Dolares / Ha.	1.925.26	2.054,23	2.264,09	2.311,70	1.586,58
	Dolares / TM.	256,70	241,67	266,36	256,86	244,09

Nota. Tomado de “Costos de Producción de arroz”, por MINAGRI, 2015.

5. Análisis ambiental

La producción de arroz trae consigo el subproducto o desecho de la cáscara. La cáscara de arroz no tiene mucha utilidad, no puede usarse como alimento para animales ni para la producción de papel, sino solo como combustible para el secado de arroz. La cáscara de arroz luego de sufrir combustión deja aproximadamente un 20% considerado como ceniza. (Behak, 2017) Este porcentaje puede ser empleado para la estabilización de suelos y con ello dejaría de ser un desecho, lo cual contribuiría a la reutilización de este material. El reuso del material contribuye a reducir la incidencia ambiental de la producción de arroz, aunque se debería de analizar más en detalle las emisiones de la

quemada controlada para la obtención de la ceniza para tener todos los detalles completos en cuanto a su elaboración.

6. Resultados

6.1. Resultados de los ensayos de propiedades mecánicas

Se tomaron resultados de distintas investigaciones, debido a la actual coyuntura, cuyo objetivo fue similar al de esta investigación. En este apartado se presentarán los resultados de cuatro investigaciones mostrando los parámetros definidos como granulometría, límites de Atterberg, óptimo contenido de humedad, máxima densidad seca y la capacidad de soporte del suelo.

6.1.1. Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo

Para la primera investigación a tratar se tomó el proyecto de investigación de las bach. Paola Gálvez y Jessica Santoyo (2019) quienes evalúan cómo influye la incorporación de CCA para la estabilización del suelo cohesivo a nivel de subrasante en una carretera de la selva peruana, con este fin, analizan las propiedades mecánicas de cuatro muestras de suelo arcilloso con diferentes combinaciones de porcentaje incorporado de CCA: 0%, 3%, 10% y 15%. Los estudios fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Jaén y la materia prima fue extraída de una ladrillera local.

Análisis Granulométrico

En la tabla 6 se muestra el análisis granulométrico para las 4 combinaciones de suelo arcilloso con ceniza de cáscara de arroz representado en porcentajes.

Tabla 6.

Resultados del análisis granulométrico de las muestras consideradas para la investigación.

MUESTRAS	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
	GRAVAS (%)	ARENAS (%)	FINOS (%)
SA 100	0 %	46.92	53.08
SA 97 – CCA 3	0 %	47.14	52.86
SA 90 – CCA 10	0 %	49.20	50.08
SA 85 – CCA 15	0 %	52.90	47.10

*SA: Suelo Arcilloso

*CCA: Ceniza de Cáscara de Arroz

Nota. Tomado de “Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, Carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo”, por Gálvez, P y Santoyo, S, 2019.

Límites de Atterberg

Se procedió a la determinación de los límites de Atterberg mediante ensayos los cuales dan respuestas del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, cuyos resultados se presentan en la tabla 7.

Tabla 7.

Resultados de límites de Atterberg para las combinaciones de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz.

MUESTRAS	LÍMITES DE ATTERBERG		
	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)
SA 100	36	25	11
SA 97 – CCA 3	43	30	13
SA 90 – CCA 10	50	NP	NP
SA 85 – CCA 15	63	NP	NP

Nota. Tomado de “Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, Carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo”, por Gálvez, P y Santoyo, S, 2019.

Según los resultados del análisis granulométrico y de los límites de consistencia se puede concluir que el suelo ensayado es una arcilla de baja plasticidad (CL) y de clasificación AASHTO A-6(4).

Ensayo Proctor modificado

A continuación, se procedió a determinar la máxima densidad seca y la humedad óptima de las muestras a partir del ensayo Proctor modificado donde se presentan los resultados para cada combinación en la tabla 8. A partir de estos resultados se puede sintetizar en un gráfico de comparación de cada parámetro con respecto al porcentaje de CCA. En la figura 7 se puede observar que se presenta una curva ascendente la cual indica que el óptimo contenido de humedad aumenta mientras se combina un mayor porcentaje de CCA al suelo arcilloso. Mientras que en la figura 8 se puede notar una curva descendente desde el 3% de CCA la cual indica que aumentando mayor al 3% de CCA se reduce la máxima densidad seca.

Tabla 8

Resultados de Ensayos de Compactación para las combinaciones de suelo arcilloso y CCA.

MUESTRAS	PROCTOR MODIFICADO	
	ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD % (OCH)	MÁXIMA DENSIDAD SECA G/CM ³ (MDS)
SA 100	14.35	1.751
SA 97 – CCA 3	17.70	1.748
SA 90 – CCA 10	20.95	1.598
SA 85 – CCA 15	25.20	1.446

Nota. Tomado de “Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, Carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo”, por Gálvez, P y Santoyo, S, 2019.

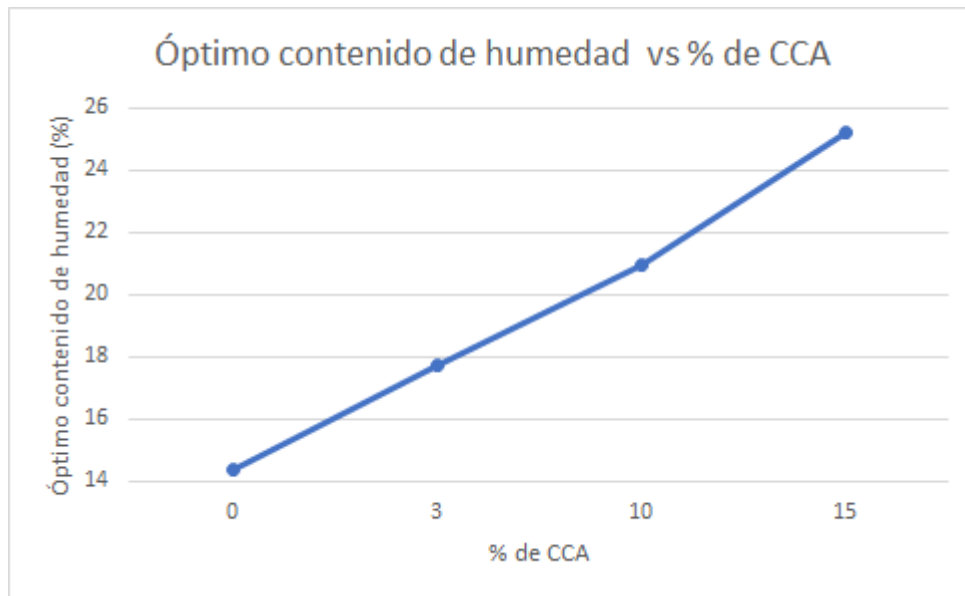


Figura 7. Óptimo contenido de humedad vs % de CCA

Adaptado de “Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, Carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo”, por Gálvez, P y Santoyo, S, 2019.

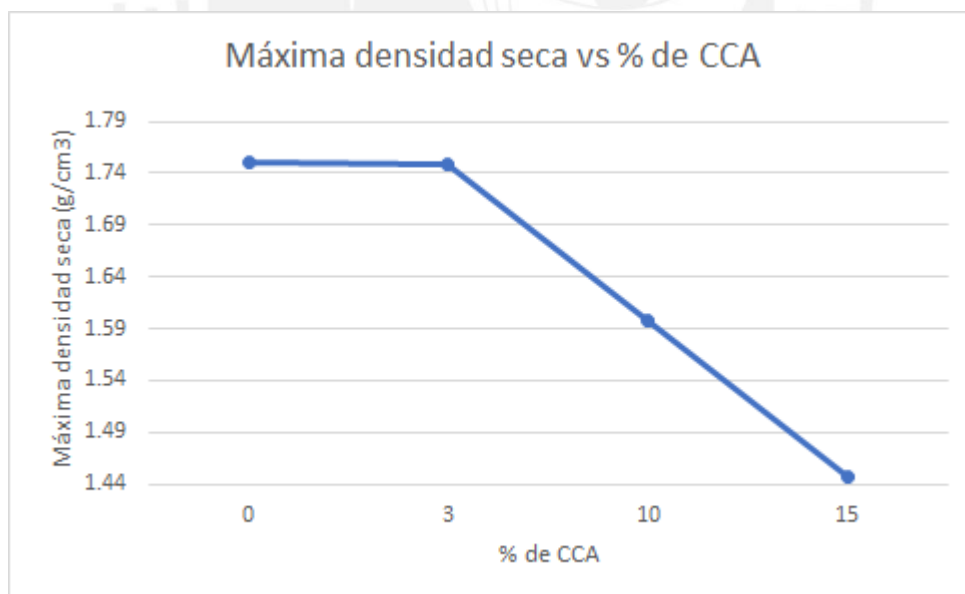


Figura 8. Máxima densidad seca vs % de CCA

Adaptado de “Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, Carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo”, por Gálvez, P y Santoyo, S, 2019.

Ensayo CBR

Finalmente, determinó el valor correspondiente al CBR al 95% para cada una de las muestras analizando los valores de expansión a 4 días de cada una. De la tabla 9 se puede observar que mientras se aumenta el porcentaje de CCA, aumenta el CBR y que a 15% de inclusión de CCA se presenta la mayor cantidad de soporte de resistencia máximo en 13.77 aumentado 3.51 veces la resistencia inicial sin CCA.

Tabla 9

Resultados de Valores de CBR de las combinaciones de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz

MUESTRAS	CBR 95%
Suelo Arcilloso	3.92
SA 97 – CCA 3	6.68
SA 90 – CCA 10	10.93
SA 85 – CCA 15	13.77

Nota. Adaptado de “Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, Carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo”, por Gálvez, P y Santoyo, S, 2019.

6.1.2. Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016

Los parámetros evaluados en el trabajo de investigación realizado por Luz Yanet Llamoga Vásquez fueron hallados en las instalaciones de los laboratorios de la Universidad Peruana del Norte, sección Ingeniería Civil; y fueron los siguientes:

Contenido Humedad: La muestra ensayada presentó una humedad promedio de 17%

Análisis Granulométrico. Según la NTP 339.128-1999. Clasificación de suelo:

En la figura 9 se presenta la curva granulométrica del suelo arcilloso donde se concluye que se presenta su clasificación SUCS CL, una arcilla de baja a media

plasticidad, y su clasificación AASHTO es A-7-6 (8). Además, en la tabla 10 se presenta el análisis granulométrico para cada combinación de suelo arcilloso con un porcentaje de CCA.

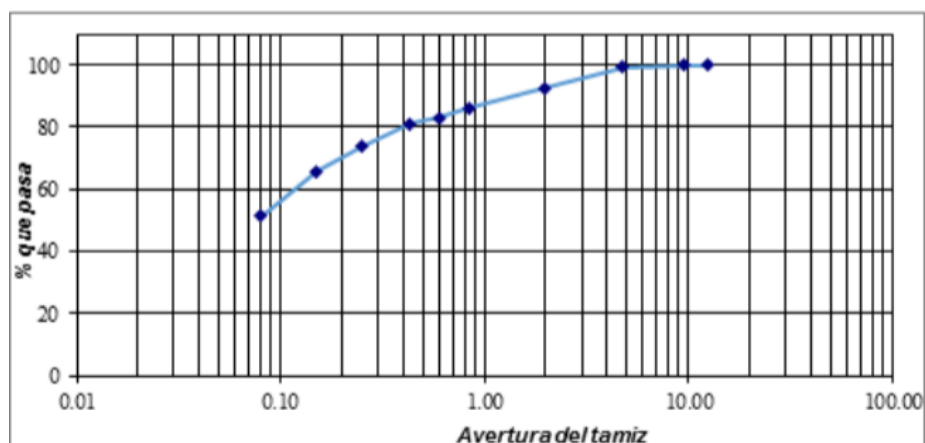


Figura 9. Granulometría del suelo empleado.

Tomado de “Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016”, por Llamoga, L, 2017.

Tabla 10

Resultados de análisis granulométrico para cada combinación de suelo arcilloso y un porcentaje de CCA.

Muestras	Análisis Granulométrico		
	Grava %	Arenas %	Limos y arcillas %
SA 100	0	46.92	53.08
SA 97 - CCA3	0	47.14	52.86
SA 90 - CCA10	0	49.2	50.08
SA 85 - CCA15	0	52.9	47.1

Nota. Adaptado de “Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, Carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo”, por Gálvez, P y Santoyo, S, 2019.

Contenido óptimo de cal. Según el método de ensayo ASTM D-6276:

Se utilizó un suelo con un contenido de cal de 6% recomendado para evaluar el comportamiento de la ceniza en el suelo y aproximarse al pH óptimo de 12.4 para estabilizar un suelo con cal.

Límites de Atterberg. Según lo indicado en la NTP 339.129-1999:

Los límites de Atterberg se tomaron en ensayos para muestras sin CCA, 4% de CCA, 7% de CCA y 10% de CCA. En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos donde se observa que el índice de plasticidad fue disminuyendo hasta llegar al 10% de CCA, donde hubo un aumento significativo hasta el 21.41% de IP.

Tabla 11

Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de plasticidad

Muestras	LL %	LP%	IP %
SA 100	44.53	24.51	20.02
SA 96 - CCA4	36.33	22.3	14.03
SA 93 - CCA7	27.51	19.38	8.14
SA 90 - CCA10	46.42	25	21.41

Nota. Adaptado de “Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016”, por Llamoga, L, 2017.

Ensayo Proctor. Según lo indicado en la NTP 339. 141 - 1999

En la tabla 12 se presentan los resultados del óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca determinado mediante un ensayo Proctor modificado para cada porcentaje de CCA. Además, en la Figura 10 se observa que el óptimo contenido de humedad aumenta mientras se añade mayor cantidad de porcentaje de CCA. Mientras que en la figura 11 se observa que la máxima densidad aumenta hasta que se llega al 7% de CCA y luego disminuye considerablemente hasta 1.707 kg/m³ cuando se agrega 10% de CCA.

Tabla 12

Resultados de Proctor Modificado, óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca

PROCTOR MODIFICADO		
Muestras	Óptimo contenido de humedad % (OCH)	Máxima densidad seca kg/m ³ (MDS)
SA 100	16.37	1.722
SA 96 - CCA4	17.56	1.735
SA 93 - CCA7	17.87	1.762
SA 90 - CCA10	19.23	1.707

Nota. Adaptado de “Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016”, por Llamoga, L, 2017.

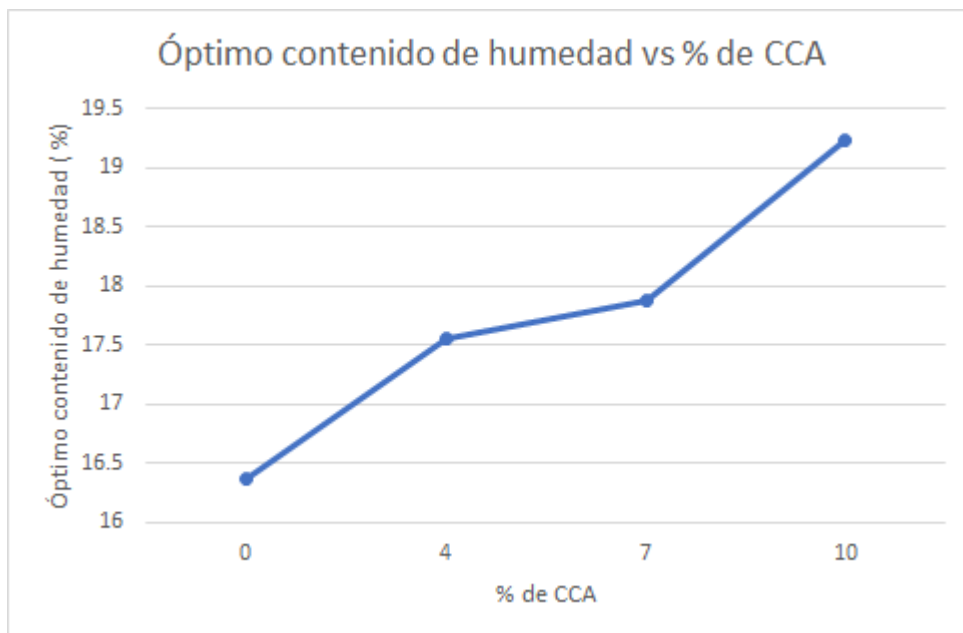


Figura 10. Óptimo contenido de humedad vs % de CCA

Adaptado de “Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016”, por Llamoga, L, 2017.

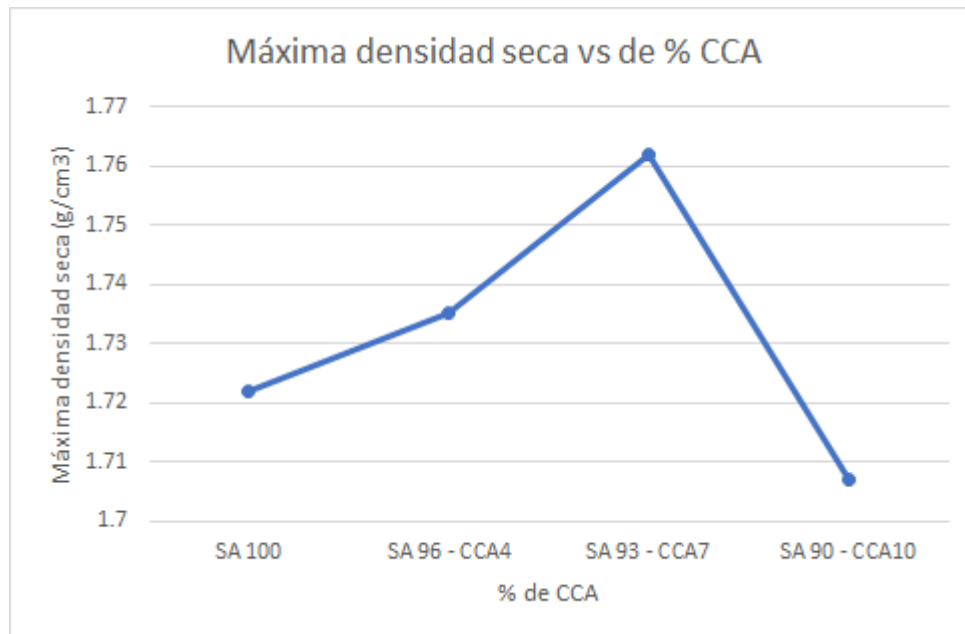


Figura 11. Máxima densidad seca vs % de CCA

Adaptado de "Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016", por Llamoga, L, 2017.

Ensayo CBR

En el ensayo de CBR, según la NTP 339.145-1999, se sometió la muestra a condiciones de humedad determinada e hinchamiento anotado a la prueba de carga-penetración de donde se obtuvo la curva esfuerzo-deformación del suelo para calcular el esfuerzo en el perfil y obtener el CBR mediante las siguientes tablas, para 0% de CCA y 7% de CCA, de resultados resaltantes propiedad de la autora:

Tabla 13

Resultados de CBR con 0% de CCA.

MOLDE N°	MOLDE N° 01		MOLDE N° 02		MOLDE N° 03	
Penetración	0.1 "	0.2 "	0.1 "	0.2 "	0.1 "	0.2 "
Esfuerzo Terreno (lb/pulg ²)	21.50	38.22	35.83	57.32	50.16	81.21
Esfuerzo Patrón (lb/pulg ²)	1000	1500	1000	1500	1000	1500
CBR (%)	2.15	2.55	3.58	3.82	4.02	5.14
Ds (gr/cm ³)	1.615	1.615	1.724	1.724	1.760	1.760

Nota. Tomado de “Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016”, por Llamoga, L, 2017.

Tabla 14

Resultado de CBR con 7% de CCA.

MOLDE N°	MOLDE N° 01		MOLDE N° 02		MOLDE N° 03	
Penetración	0.1 "	0.2 "	0.1 "	0.2 "	0.1 "	0.2 "
Esfuerzo Terreno (lb/pulg ²)	45.38	83.60	78.82	143.31	97.93	186.31
Esfuerzo Patrón (lb/pulg ²)	1000	1500	1000	1500	1000	1500
CBR (%)	4.54	5.57	7.88	8.55	9.42	9.79
Ds (gr/cm ³)	1.615	1.615	1.735	1.735	1.768	1.768

Nota. Tomado de “Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016”, por Llamoga, L, 2017.

Del mismo modo determinó los ensayos para un porcentaje de 4% de CCA y 10% de CCA. En la tabla 15 se presentan los resultados finales para todas las combinaciones con el suelo arcilloso; es decir, con 0% de CCA, 4% de CCA, 7% de CCA y 10% de CCA.

Tabla 15

Resultados de CBR para cada % de CCA

Muestras	CBR al 95%
SA 100	2.85
SA 96 - CCA4	4.52
SA 93 - CCA7	7.8
SA 90 - CCA10	2

Nota. Adaptado de “Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016”, por Llamoga, L, 2017.

6.1.3. Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv. San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018

La siguiente investigación pertenece a Fernando Díaz Vázquez y consiste en el mejoramiento de la subrasante de una carretera en el departamento de Amazonas donde se encuentran grandes cantidades de arcilla. Para lo cual se realizaron los ensayos en los laboratorios de DG Ingenieros S.A.C. ubicados en Bagua Grande, Amazonas y obtuvieron los siguientes resultados:

Análisis granulométrico y límites de Atterberg

Realizó dos calicatas para la obtención de la muestra, en la tabla 16 se muestran los resultados granulométricos y en la tabla 17 se presentan los resultados del límite de Atterberg donde se obtiene el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. De estas tablas se puede apreciar que el suelo predominante es cohesivo, en una calicata se encontró arcilla de alta plasticidad y en el siguiente limo de alta plasticidad.

Tabla 16

Análisis Granulométrico del suelo.

Muestras	Análisis Granulométrico					
	Gravas (%)	Arenas (%)	Limos y arcillas (%)	Humedad (%)	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO
CALICATA 01	0.95	27.90	71.15	23.70	CH	A-7-6(17)
CALICATA 02	0.00	29.86	70.14	17.86	MH	A-7-6 (16)

Nota. Tomado de “Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018”, por Díaz Vázquez, F, 2018.

Tabla 17

Límites de Atterberg.

Muestras	Límites de Atterberg		
	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
CALICATA 01	54.40	28.10	26.30
CALICATA 02	50.80	28.40	22.30

Nota. Tomado de “Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018”, por Díaz Vázquez, F, 2018.

De la tabla 17 se puede observar los resultados para el suelo sin CCA y presenta un índice de plasticidad, en la calicata 01, de 26.3% y en la calicata 02, de 22.30%. Además, el investigador planteó sus muestras de suelo de la siguiente manera:

Tabla 18

Combinaciones de mezclas de suelo con CCA.

Combinación	Porcentaje de suelo arcilloso	Porcentaje de ceniza de cascara de arroz	Simbología
Suelo arcilloso	100	0	S
Ceniza de cascara de arroz	0	100	CA
Combinación 1	90	10	S90 – CA10
Combinación 2	85	15	S85 – CA15
Combinación 3	80	20	S70 – CA20
Combinación 4	75	25	S75 – CA25

Nota. Tomado de “Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018”, por Díaz Vázquez, F, 2018.

Cada mezcla con su debida nomenclatura y porcentajes definidos.

Ensayo Proctor

En lo que respecta al Ensayo Proctor se hallaron las máximas densidades secas junto con su humedad óptima para ambas calicatas sin la adición de CCA y con las combinaciones de porcentajes de CCA. En la tabla 19 se presenta un resumen de estos resultados obtenidos de la autora.

Sin CCA: Calicata 1: MDS = 1.85 g/cm³; Humedad óptima = 11.2%

Calicata 2: MDS = 1.83 g/cm³; Humedad óptima = 11%

Con CCA: Combinación 1: MDS = 1.85 g/cm³; Humedad óptima = 9.4%

Combinación 2: MDS = 1.86 g/cm³; Humedad óptima = 8.6%

Combinación 3: MDS = 1.88 g/cm³; Humedad óptima = 8.1%

Combinación 4: MDS = 1.86 g/cm³; Humedad óptima = 7.8%

Tabla 19

Resultados de ensayo Proctor Modificado

PROCTOR MODIFICADO			
COMBINACIONES C-01	%CCA	Óptimo contenido de humedad % (OCH)	Máxima densidad seca g/cm ³ (MDS)
S100	0	11.2	1.85
S90 - CA10	10	9.4	1.85
S85 - CA15	15	8.6	1.86
S80 - CA20	20	8.1	1.88
S75 - CA25	25	9.6	1.86

Nota. Adaptado de “Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018”, por Díaz Vázquez, F, 2018.

En la figura 12 se presenta un gráfico del óptimo contenido de humedad con respecto al porcentaje de CCA y se observa que mientras se aumenta un porcentaje de CCA se disminuye el agua hasta que llega a un punto de inflexión en S80 - CA20. Además, en la figura 13 se presenta la máxima densidad seca con respecto al porcentaje

de CCA y se observa que el pico de máxima densidad seca sucede en S80 - CA20 por lo que este será el porcentaje de CCA óptimo de acuerdo a este parámetro.

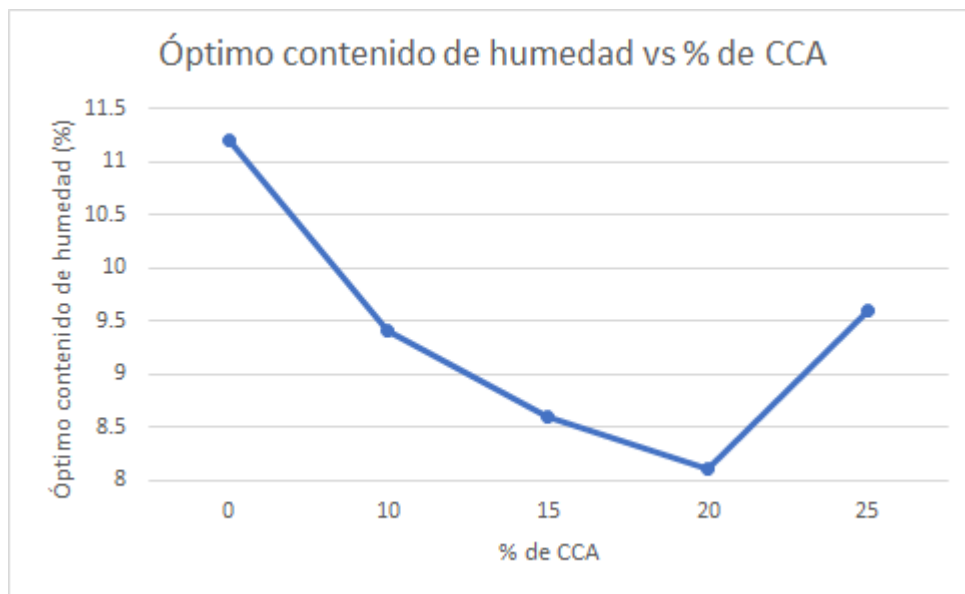


Figura 12. Óptimo contenido de humedad vs % de CCA

Adaptado de “Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018”, por Díaz Vázquez, F, 2018.

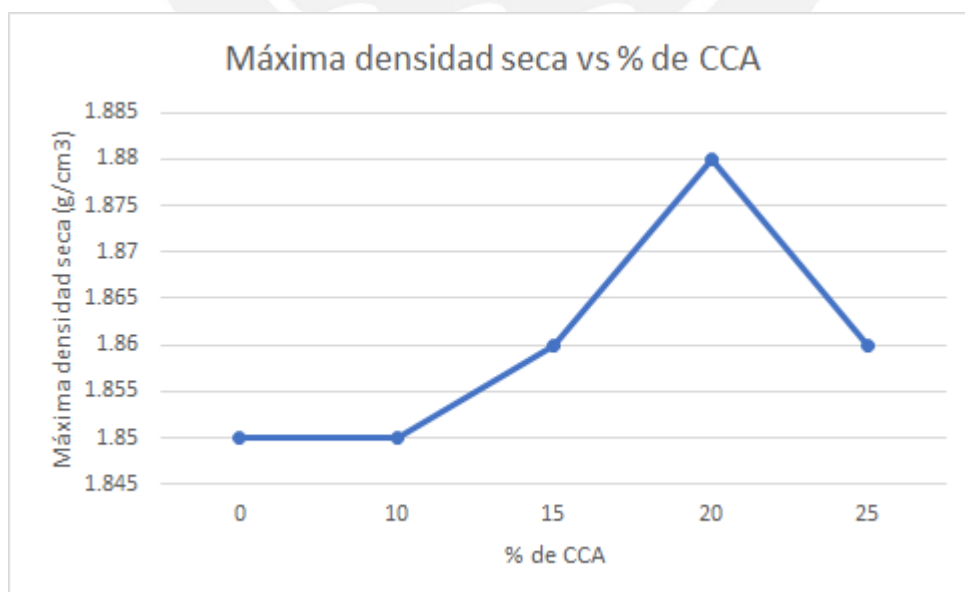


Figura 13. Máxima densidad seca vs % de CCA

Adaptado de “Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018”, por Díaz Vázquez, F, 2018.

Ensayo CBR

En la tabla 20 se presentan los resultados del CBR para las combinaciones del suelo arcilloso con cada porcentaje de CCA. En este caso el autor muestra los CBR al 95% y al 100% para ver los porcentajes de las mezclas.

Tabla 20

Resultados de CBR para las mezclas de suelo.

Muestras	CBR al 95 %	CBR al 100 %
S100	8.0 %	9.7 %
S90 – CA10	9.0 %	10.8 %
S85 – CA15	11.5 %	13.2 %
S80 – CA20	13.8 %	15.2 %
S75 – CA25	11.3 %	14.8 %

Nota. Tomado de “Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018”, por Díaz Vázquez, F, 2018.

6.1.4. Estabilización de suelos arcilloso con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante

En la investigación realizada por Axel Castro Cuadra (2017) en el departamento de San Martín, se busca cuantificar el efecto de la adición de la ceniza de cáscara de arroz para la mejora de subrasantes y, además, busca ver el efecto que tiene la adición de un pequeño porcentaje de cal a la mezcla de suelo. Cabe resaltar que el CBR inicial del suelo encontrado en la investigación fue de 5%, el cual, según el MTC, debe ser estabilizado. En primer lugar, los ensayos fueron realizados en Laboratorios “LASA” Ingenieros

ubicado en la ciudad de Moyobamba, San Martín. Y también es importante acotar lo que el investigador define como cada una de las muestras con sus debidos porcentajes en las siguientes tablas:

Tabla 21

Proporción de combinación de los materiales sus símbolos para las combinaciones de suelo arcilloso y CCA.

Combinación	Porcentaje de suelo arcilloso	Porcentaje de ceniza de cáscara de arroz	Simbología
Suelo arcilloso	100	0	S
Ceniza de cáscara de arroz	0	100	CCA
Combinación 1	90	10	S90-CCA10
Combinación 2	80	20	S80-CCA20
Combinación 3	70	30	S70-CCA30
Combinación 4	60	40	S60-CCA40

Nota. Tomado de “Estabilización de suelos arcilloso con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante”, por Castro Cuadra, A, 2017.

Se puede observar que se plantearon un sets de muestras, con la mezcla únicamente de ceniza de cáscara de arroz. A cada muestra se le realizó el ensayo Proctor para poder hallar su máxima densidad seca junto con su contenido óptimo de humedad, como se muestra a continuación:

Tabla 22

Ensayo de compactación para las combinaciones de suelo

Muestras	Proctor Modificado	
	Óptimo contenido de Humedad % (OCH)	Máxima densidad seca g/cm ³ (MDS)
SOIL 100	16.90	1.81
S90 - CCA10	19.20	1.68
S80 - CCA20	20.00	1.61
S70 - CCA30	22.00	1.50
S60 - CCA40	28.00	1.34
CCA 100	52.50	0.89

Nota. Tomado de “Estabilización de suelos arcilloso con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante”, por Castro Cuadra, A, 2017.

En la figura 14 se muestra el óptimo contenido de humedad con respecto al porcentaje de CCA usado en la combinación con el suelo arcilloso. Se puede notar que la línea es ascendente lo cual quiere decir que mientras aumente el porcentaje de CCA, también aumentará el óptimo contenido de humedad. En la figura 15 se presenta la máxima densidad seca con respecto al porcentaje de CCA y ocurre lo contrario; es decir, este parámetro disminuye cuando se aumenta el porcentaje de CCA.

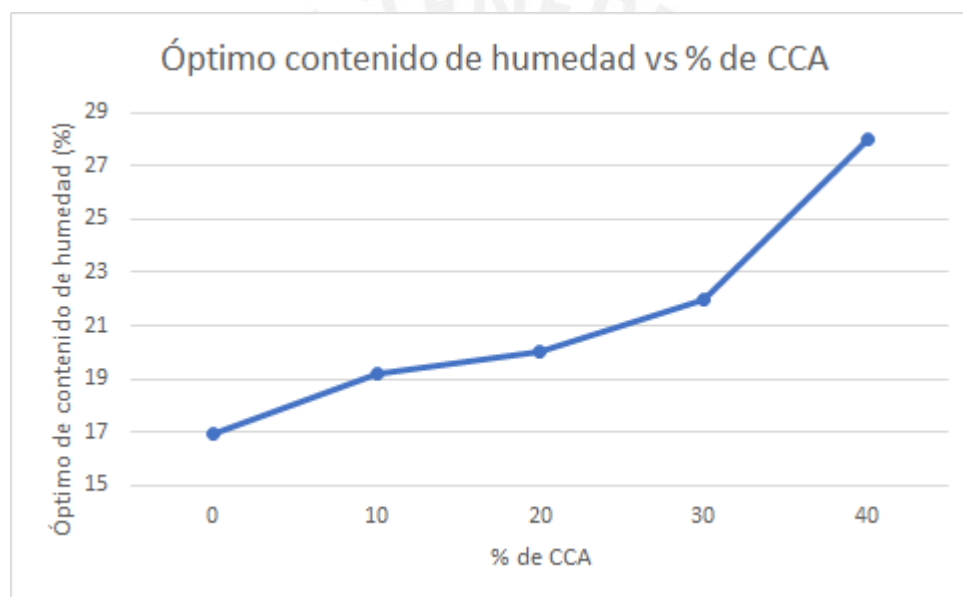


Figura 14. Máxima densidad seca vs % de CCA

Adaptado de “Estabilización de suelos arcilloso con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante”, por Castro Cuadra, A, 2017.

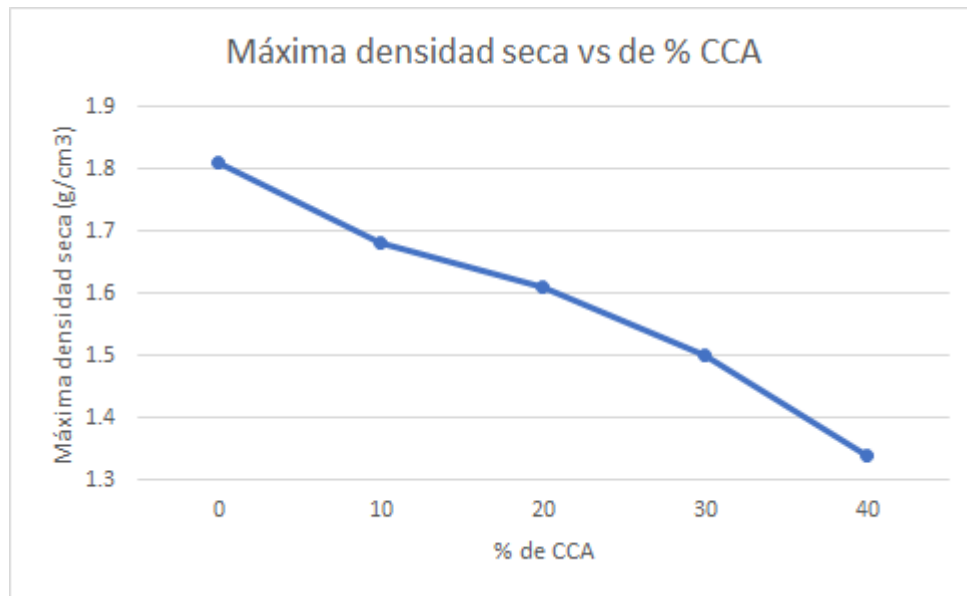


Figura 15. Máxima densidad seca vs % de CCA

Adaptado de “Estabilización de suelos arcilloso con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante”, por Castro Cuadra, A, 2017.

Finalmente, para ambas muestras, el investigador realizó el ensayo del CBR para poder ver si es que existe un incremento en el porcentaje debido a la adición de la ceniza de cáscara de arroz. Estos resultados son presentados en las siguientes tablas:

Tabla 23

Resultados de Valores de CBR de las combinaciones de suelo arcilloso y CCA

Muestras	CBR (%)
SOIL 100	5.00
S90 - CCA10	16.30
S80 - CCA20	19.40
S70 - CCA30	13.2
S60 - CCA40	13.0

Nota. Tomado de “Estabilización de suelos arcilloso con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante”, por Castro Cuadra, A, 2017.

Se puede observar un incremento en el CBR para ambos sets de muestras en donde el subrasante se vuelve adecuada para la construcción del pavimento, la tendencia es creciente hasta el 20% de CCA. Una vez llegado a este tope el CBR comienza a disminuir nuevamente.

6.1.5. Resumen de las investigaciones analizadas

Se presenta la tabla resumen con los resultados de las investigaciones citadas que incluyen las mezclas, y los resultados para máxima densidad seca, humedad óptima y CBR seguida de gráficos para apreciar la dispersión de los resultados obtenidos. Se debe tener en consideración que los resultados son para muestras e investigaciones distintas y que no se puede afirmar hasta este punto que haya datos dudosos ni baja confiabilidad de los ensayos o las investigaciones realizadas.

Para el resumen de los resultados de todos los parámetros mostrados de todas las investigaciones se elaboró la siguiente tabla.

Tabla 24

Resumen de los resultados de las investigaciones.

Nro	Apellido, N.	Clasificación Material	Mezcla	Máxima densidad seca (g/cm ³)	Humedad Óptima (%)	CBR (%)
6.1.1.	Galvez, P.; Santoyo, J.	CL - Suelo Arcilloso de baja plasticidad. A-6(4). Suelo arcilloso	SA100	1.751	14.35	3.92
			SA97-CCA3	1.748	17.70	6.68
			SA90-CCA10	1.598	20.95	10.93
			SA85-CCA15	1.446	25.20	13.77
6.1.2.	Llamoga, L.	CL - Suelo Arcilloso de baja a media plasticidad. A-7-6(8). Suelo arcilloso	SA0%CCA	1.723	15.73	3.55
			SA4%CCA	1.735	17.56	6.69
			SA7%CCA	1.655	19.45	7.88
			SA10%CCA	1.631	20.25	3.11
6.1.3.	Díaz, F.	CH - Suelo Arcilloso de alta plasticidad. A-7-6(17). Suelo arcilloso	S100	1.850	11.20	8.00
			S90-CCA10	1.850	9.40	9.00
			S85-CCA15	1.860	8.60	11.50
			S80-CCA20	1.880	8.10	13.80
			S75-CCA25	1.860	7.80	11.30
6.1.4.	Castro, A.	CL - Suelo Arcilloso de baja plasticidad. A-6(0). Suelo arcilloso	S100	1.810	16.90	5.00
			S90-CCA10	1.740	18.20	16.30
			S80-CCA20	1.610	21.00	19.40
			S70-CCA30	1.410	26.50	13.20
			S60-CCA40	1.290	30.00	13.00

Nota. Fuente Propia.

A partir de la tabla 24 es posible realizar comparaciones entre los resultados de óptimo contenido de humedad de acuerdo a cada porcentaje de CCA ensayada por cada autor.

Para un análisis de estos se elaboró la siguiente figura

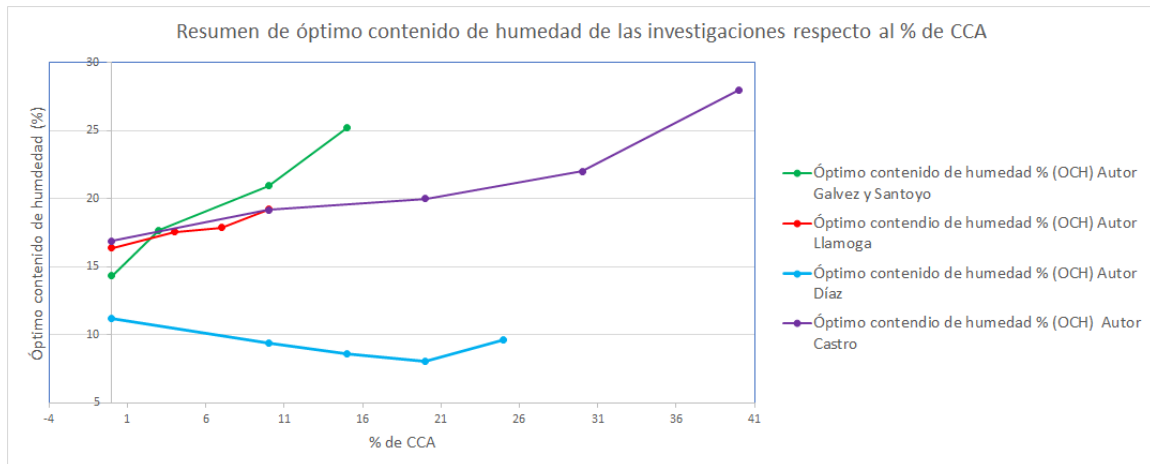


Figura 16. Análisis de los valores de Humedad Óptima con respecto al % incluido de CCA de las investigaciones correspondientes.

Fuente Propia

De la misma manera es posible realizar comparaciones entre los resultados de máxima densidad seca de acuerdo a cada porcentaje de CCA ensayada por cada autor. Por esta razón se elaboró la siguiente figura.

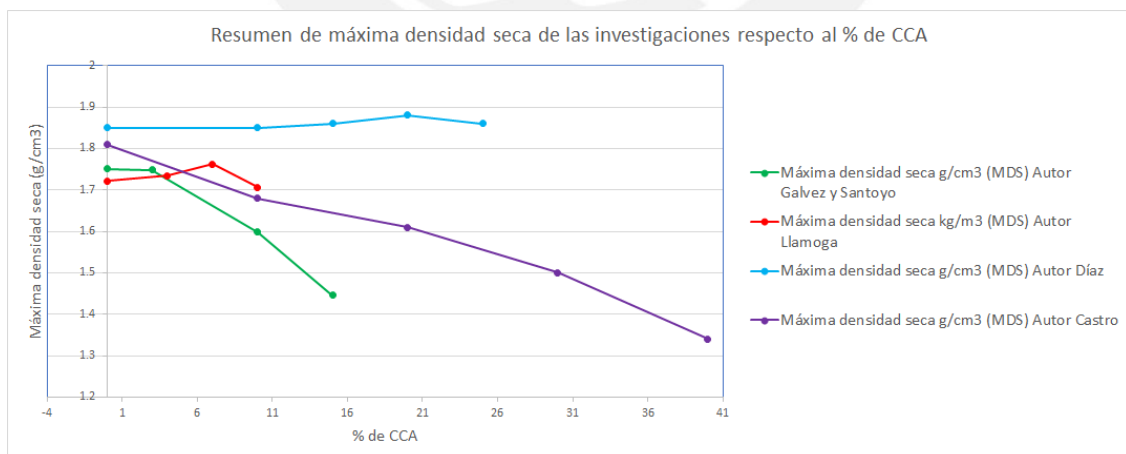


Figura 17. Análisis de los valores de máxima densidad seca con respecto al % incluido de CCA de las investigaciones correspondientes.

Fuente Propia

Por último, se presentan los resultados de CBR de acuerdo a cada porcentaje de CCA para una mejor comparación. Por esta razón se elaboró la siguiente figura.

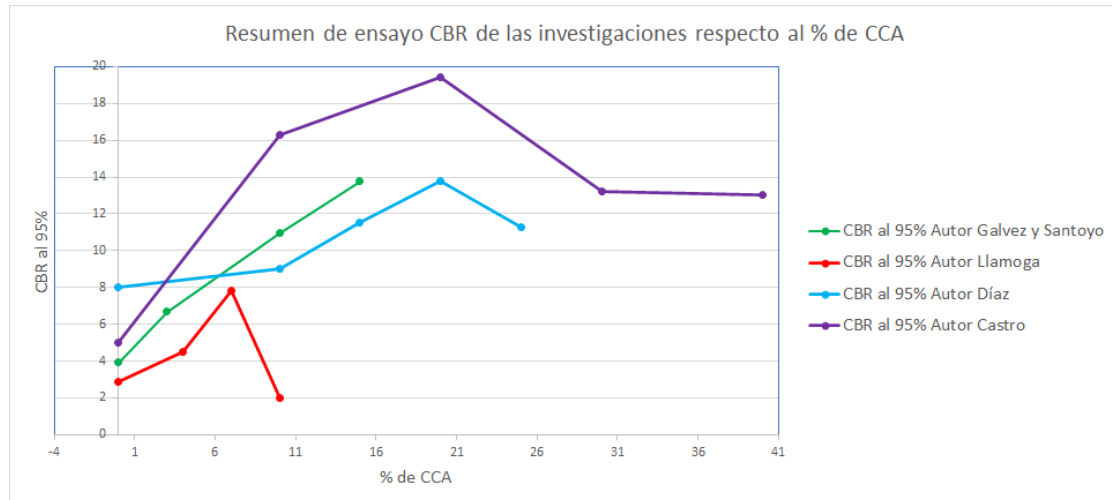


Figura 18. Análisis de los valores de CBR con respecto al % incluido de CCA de las investigaciones correspondientes.

Fuente Propia

6.2. Resultados del estudio económico realizado

Los costos del primer producto a evaluar, es decir, la CCA, se obtuvieron de tres proveedores mayoristas tanto peruanos como extranjeros; se realizó un promedio entre los tres precios por kilogramo. Se elaboró la Tabla 25 donde se muestran los costos del CCA.

Tabla 25

Costos de la CCA por kilogramo.

	Costo (S./.)	Monto de CCA (kg)	Costo (S./.) /kg
1	320	1000	0.32
2	426	1000	0.43
3	356	1000	0.36
			0.37

Nota. Tabla de elaboración propia

Los costos del segundo producto a evaluar, es decir, la Cal, se obtuvieron de tres diferentes tipos de Cal que se explicaron de forma breve anteriormente. Se realizó un promedio entre los tres precios por kilogramo. Se elaboró la Tabla 26 donde se muestran los costos de la cal.

Tabla 26

Costos de la cal por kilogramo.

	Costo (S/.)	Monto de cal (kg)	Costo/kg	Descripción
1	20	35	0.57	Cal hidráulica natural
2	0.3	1	0.30	Cal aérea tipo CL-90-S
3	14.2	30	0.47	Cal hidratada
			0.45	

Nota. Tabla de elaboración propia

Los costos del tercer producto a evaluar, es decir, el cemento, se obtuvieron de tres marcas de cemento TIPO I. Se realizó un promedio entre los tres precios por kilogramo. Se elaboró la Tabla 27 donde se muestran los costos del cemento.

Tabla 27

Costo del cemento por kilogramo.

	Costo (S/.)	Monto de Cemento (kg)	Costo/kg	Descripción
1	22.3	42.5	0.52	Cemento Sol Tipo I
2	20.5	42.5	0.48	Cemento APU Tipo I
3	23.5	42.5	0.55	Cemento Yura Tipo I
			0.52	

Nota. Tabla de elaboración propia

Finalmente, se usan porcentajes estimados y promedios extraídos de la bibliografía, en el caso de la CCA normalmente los porcentajes son de 7%-15%, en la Cal se usa de 3%-7% y para el cemento en promedio es un 10%. Todos los porcentajes son en base del peso seco del material de subrasante que se tiene. Para fines prácticos se

propone usar 100 kg de material de subrasante para que así, se obtenga cuánto sería el monto, en kg, de los productos evaluados y por ende su costo parcial. Se elaboró la tabla 28 donde se muestran los costos parciales de las tres alternativas contempladas.

Tabla 28

Costos parciales aproximados del uso de CCA, cal y cemento.

Elemento de refuerzo	% utilizado	Monto (kg)	Costo/kg	Costo parcial (S/.)
CCA	8%	8	0,37	2,96
Cal	7%	7	0,45	3,15
Cemento	10%	10	0,52	5,2

Nota. Tabla de elaboración propia

6.3. Resultados del estudio ambiental

Se realizaron dos corridas en el programa SimaPro para poder averiguar el Global Warming Potential (GWP), que es un indicador de la cantidad de gases de efecto invernadero que genera una actividad en unidad de peso de dióxido de carbono (CO₂), de los procesos de producción de Cemento Portland y arroz. Se obtuvieron los siguientes resultados:

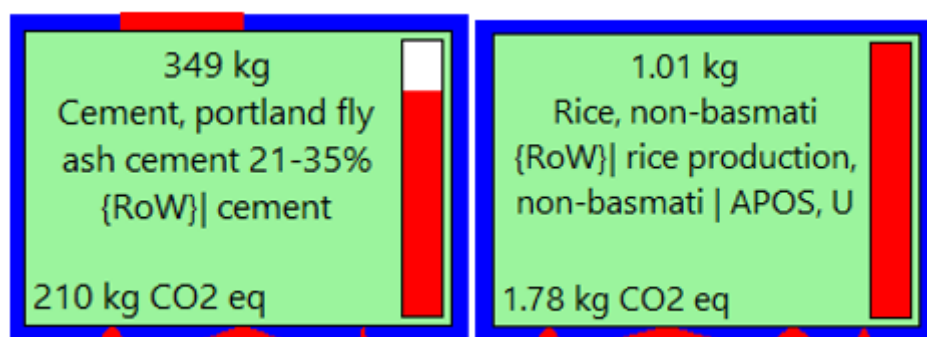


Figura 19. Emisiones de la producción de arroz y cemento.

Figuras de elaboración propia empleando SimaPro.

Se puede observar que la producción de Cemento Portland tiene casi 210 veces más GWP que la producción de arroz lo cual indica que es una actividad mucho más dañina para la atmósfera, e incluso considerando la calcinación controlada de este subproducto se puede inferir que el impacto es significativamente menor. Es aquí donde el empleo de la ceniza de cáscara de arroz como material alternativo tiene una ventaja ecológica.

7. Discusión de Resultados

7.1. Discusión de los ensayos de propiedades mecánicas

Cada investigación plantea de 3 a 4 mezclas para probar el efecto de la ceniza de cáscara de arroz en el suelo. Las mezclas planteadas por tanto Gálvez y Santoyo como la de Llamoga no varían de manera uniforme en el contenido de ceniza que se le agrega, mientras que las de Díaz y Castro si tienen un variación uniforme en el contenido. Sin embargo, esto no afecta de manera significativa los resultados.

La humedad óptima varía importantemente de la localidad de origen del suelo extraído y como se puede observar en la figura 16 también, tiende a aumentar proporcionalmente al porcentaje de CCA presente en la muestra, con la excepción del proyecto de investigación de Díaz en el cual disminuye la humedad óptima hasta llegar a un 20% de CCA.

Como se puede observar en la Figura 17. Se puede notar una tendencia general en el descenso de la densidad máxima seca en las muestras con el aumento de porcentaje de ceniza de cáscara de arroz con el suelo arcilloso, esto debido a que se reemplaza el material por uno de densidad menor. Sin embargo, para Díaz este parámetro aumenta

hasta un porcentaje de 20% de CCA y para Llamoga hasta un 7% de CCA, luego descienden cuando superan estos porcentajes.

En lo que respecta al CBR se puede apreciar claramente en la mayoría de los ensayos y de las secuencias de muestras que este aumenta gradualmente junto al porcentaje de CCA incluido en la composición de la subrasante hasta que alcanza un valor máximo de un orden variable que en algunos casos puede ser de 7% como en el caso de la investigación de Llamoga, y en otros puede ser de 15% a 20% como son los casos del resto de las cuatro investigaciones. Particularmente la muestra correspondiente a la investigación de Díaz presenta un CBR de 8.00% en la muestra de suelo arcilloso de alta plasticidad debe ser reconsiderada para reforzamiento. Se considera que en caso de que se encuentre en una ubicación donde la arcilla de alta plasticidad se encuentra saturada, esta se debe estabilizar con materiales adicionales como la CCA.

7.2. Discusión del estudio económico realizado

En la tabla 28 se muestran los precios parciales del uso de CCA, cal y cemento para 100 kg de peso seco de subrasante. En esta se aprecia que el uso de CCA sale más económico que de las otras alternativas. En la siguiente Tabla 29 se da a conocer el porcentaje de ahorro aproximado al comparar los costos de la cal y cemento con los de la CCA.

Tabla 29

Porcentajes de ahorro.

Elemento de refuerzo	Costo parcial (S/.)	% de ahorro
CCA	2,96	-
Cal	3,15	6,4%
Cemento	5,2	76%

Nota. Tabla de elaboración propia

Al optar por el uso del CCA en lugar de la cal se estaría ahorrando 6.4% con respecto a costos de la CCA, y en cuanto al cemento, 76%. Cabe mencionar también que estos resultados están sujetos a variaciones debido a varios factores como: el porcentaje ideal para cada proyecto según sus características geotécnicas, disponibilidad de estos materiales en la zona, proveedores de los materiales y marcas, elementos adicionales para su aplicación, entre otros.

7.3. Discusión del estudio ambiental

En cuanto a la discusión del estudio ambiental realizado, se realizó una corrida simple en el programa SimaPro utilizando el modelo IPCC para hallar el potencial de calentamiento global y comparar de manera cuantitativa las emisiones de cada proceso y verificar cual es menos dañino para la atmósfera. En este caso, según el GWP para ambos resultados se vió que la producción de arroz produce 200 veces menos emisiones que la del Cemento Portland, por tanto, es una alternativa más eco amigable que el cemento en lo que respecta a emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

8. Conclusiones

De las cuatro investigaciones tomadas se puede verificar que la inclusión de la CCA en subrasantes arcillosas tiene un efecto positivo en cuanto a sus propiedades mecánicas. Esto se puede ver en tanto la Tabla 24 como en la Figura 18 donde el CBR aumenta a medida que se le agrega el CCA al suelo, pero este tiene un máximo similar al ensayo Proctor y luego de llegar a este valor el CBR comienza a disminuir. En general, la CCA cumple la función de estabilizar a las subrasantes arcillosas, pero se debe de tomar en cuenta la cantidad necesaria que se debe agregar. En las investigaciones listadas anteriormente existe una gran variabilidad en cuanto al porcentaje óptimo de CCA

añadido, esto se debe mayormente a la alta variabilidad de los suelos en las distintas regiones del país. En la primera investigación de Gálvez y Santoyo se encontró que la CCA genera un aumento de 9.8% aproximadamente en el valor del CBR con la adición del 15% de ceniza de cáscara de arroz. Para la investigación de Llamoga, el contenido óptimo de CCA fue de 7% lo cual le resultó un aumento de 5% en el CBR. Para la investigación de Díaz, se encontró un aumento de 7% para el CBR con una mezcla que incluye un 20% de CCA. Finalmente, para la investigación de Castro, se obtuvo el aumento más significativo con respecto a las otras investigaciones de 14% al valor de CBR con una mezcla que incluye 20% de CCA. Las zonas donde se realizaron cada una de las investigaciones son las siguientes: Llamoga hace su investigación en Cajamarca al igual que Gálvez y Santoyo, pero en la provincia de Jaén. Mientras que Díaz la hace en Amazonas y Castro en San Martín, ambas regiones ubicadas en la selva. Estas diferencias permiten que haya una variación que debe tomarse en consideración en las clasificaciones y composiciones de los suelos, principalmente en lo que corresponde a sus propiedades físicas y los límites de Atterberg, el índice de plasticidad por ejemplo que en todas las muestras evaluadas es distinto. También se puede afirmar que, aunque existan ciertas variaciones para el contenido de CCA se puede generar un margen referencial entre 7-20% de contenido para obtener un aumento óptimo en el valor del CBR, por lo que se recomienda tratar de realizar más ensayos con porcentajes mayores y menores a los del margen para poder establecer de manera más precisa el contenido óptimo.

En el ámbito económico y con las condiciones planteadas, la opción más económica para la estabilización de subrasantes fue la de usar CCA frente a otras alternativas muy comunes en la actualidad como lo son la cal y el cemento, representando un porcentaje de ahorro de más del 6.4%.

En el aspecto ambiental, la producción de arroz tiene un menor impacto ambiental que la del cemento, hasta el punto antes de la quema. Su potencial de calentamiento global es 200 veces menor que las del cemento. Sin embargo, se deberían realizar un poco más de estudios en cuanto a la quema de esta para poder obtener un valor más preciso de las emisiones de CO₂ que esta genera.

En general, la incorporación de la CCA para la estabilización de subrasantes es una técnica que tiene poca aplicación en la actualidad, a pesar de sus múltiples ventajas en los diferentes ámbitos como el económico, ambiental y mecánico. Esto se debe en parte, a la desinformación y a la preferencia de las personas de mantener los métodos tradicionales de estabilización de suelos. Con el presente trabajo se pretende difundir la información sintetizada y actualizada de este material no convencional aplicable a la ingeniería de caminos. Si esta alternativa es tomada en cuenta, no solo ayudaría a generar materiales de un desecho que hace poco era simplemente incinerado para luego ser vertido hacia el mar o dejado en un relleno sanitario, sino que, además, haría que se puedan construir mejores pavimentos a un precio más económico del que usualmente se tiene y contribuir a reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. En la mayoría de los casos, el costo es el principal factor que rige una obra y reducirlo generaría a su vez interés por mejorar este método. A parte, brindaría una oportunidad económica a las regiones que producen una gran cantidad de arroz en el país de tener otro ingreso adicional con la venta de este material innovador y sustentable.

9. Bibliografía

- Aizpurúa, L.; Moreno, G & Caballero, K. (2018). *Estudio del concreto de alta resistencia con el uso de cenizas de materiales orgánicos y polímeros*. Paper. Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú.
- Alvarado, C., & Guerra, A. (2018). *Influencia de la adición de ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente sobre la estabilización ecológica de la mezcla suelo - sedimento en la provincia de Virú*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú
- Álvarez, M. (2015). *Estabilización Química de Suelos en Proyectos de Infraestructura Vial en Antioquía*. (Tesis de Pregrado). Escuela de Ingeniería de Antioquía. Envigado, Colombia.
- ASTM. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. Norma D698-12e2. Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM Internacional. Recuperado de: www.astm.org
- ASTM. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. Norma D1557-12e1. Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM Internacional. Recuperado de: www.astm.org
- ASTM. (2012). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. Norma D2166-06. Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM Internacional. Recuperado de: www.astm.org
- ASTM. (2012). *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. Norma D3282-15. Pennsylvania, Estados Unidos: ASTM Internacional. Recuperado de: www.astm.org
- Behak, L. (2017). *Soil Stabilization with Rice Husk Ash*. Soils stabilization in Pavement Engineering. Doi: 10.5772/66311. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/315854034_Soil_Stabilization_with_Rice_Husk_Ash

- Behak, L., & Peres, W. (2008). Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación. *Revista Ingeniería de Construcción*, 23, 34-41. Colombia. Doi: 10.4067/S0718-50732008000100004.
- Castro, A. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Díaz, D. (2019). *Usos potenciales de cascarilla de arroz en el departamento de Casanare*. Monografía. Casanare, Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Recuperado de: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/30131/80811242.pdf;jsessionid=704659C17E73ED3FA7F791CADADCA077.jvm1?sequence=1>
- Díaz, F. (2018). *Mejoramiento de la subrasante mediante ceniza de cáscara de arroz en la carretera Dv San Martín - Lonya Grande, Amazonas 2018*. (Tesis de pregrado, César Vallejo, Lima, Perú). Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/25951>
- FAO. (2020). Situación alimentaria Mundial. Disponible 3 de octubre de 2020, de <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/#:~:text=Se%20prev%C3%A9%20que%20impulsada%20por,la%20estimaci%C3%B3n%20de%202019%2F20>.
- Fernández, E. J., & Velásquez, A. (2020). *Análisis de la resistencia de una base granular reemplazando su material fino por ceniza de cascarilla de arroz*. Seminario de Investigación Aplicada para el diseño y construcción de pavimentos rígidos. Girardot, Cundinamarca, Colombia: Universidad Piloto de Colombia.
- Galvez, P. & Santoyo, J. (2019). *Estabilización de suelos cohesivos a nivel de subrasante con ceniza de cáscara de arroz, carretera Yanuyacu Bajo - Señor Cautivo*. (Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Jaén, Jaén, Perú).

- García, X. (2019). *Mejoramiento de un suelo arcilloso de la localidad de Pacaisapa - Ayacucho utilizando residuos industriales para evaluarlo en muro hipotético de tierra estabilizado mecánicamente (MSEW)*. (Tesis de pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
- Hidalgo, P. (2015). *Evaluación de las emisiones de carbono del cemento Portland compuesto con ceniza de cáscara de arroz durante el proceso de fabricación*. (Tesis de postgrado). Universidad de la República Oriental del Uruguay, Montevideo, Uruguay.
- Lantin, R. (1999). *Rice Post-harvest Operations*. Post-harvest Compendium. International Rice Research Institute, Philippines: FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-ax442e.pdf>
- Legner, E. (s.f.). *Rubber and other Latex Products*. Blog. Recuperado de: <http://www.faculty.ucr.edu/~legnerref/botany/rubber.htm>
- Llamoga, L. (2017). *Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016*. (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.
- Loayza, P. (2014). *Efecto de la ceniza de cáscara de arroz sobre la resistencia a la compresión del concreto normal*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2010). *La Cadena Alimentaria del Arroz*. Recuperado de: <http://minagri.gob.pe/portal/datero/26-sector-agrario/arroz>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección: Suelos y Pavimentos*. Dirección de Caminos y Ferrocarriles. Lima, Perú. Recuperado de: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4515.pdf
- Novoa, M., Becerra, L., & Vásquez, M. (2016). *La ceniza de cascarilla de arroz y su efecto en adhesivos tipo mortero*. Bogotá, Colombia. Doi: 10901/9848. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10901/9848>

OCDE-FAO (2013). *Perspectivas agrícolas 2013-2022*. Recuperado de:

http://www.oecd.org/centrodemexico/medios/Print_OECD_FAO_Outlook_Flyer_Sp%20WEB.pdf

Ramal, R., Raymundo, J., & Chávez, J. (2019). *Materiales Alternativos para estabilizar suelos: El uso de ceniza de cáscara de arroz en vías de bajo tránsito en Piura*. Piura, Perú.

Recuperado de: <https://doi.org/10.26495/tzh.v12i1.1251>

Salas, J., Castillo, P., Sánchez de Rojas, I., & Veras, J. (Julio de 1986). Empleo de cenizas de cáscaras de arroz como adiciones de morteros. *Materiales de Construcción Vol. 36 N° 203*. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Statista, (2020). Agricultura: Superficie de cultivo de arroz a nivel mundial de 2015 a 2018. Recuperado de: <https://es.statista.com/estadisticas/600704/superficie-cultivada-de-arroz-a-nivel-mundial-2008/>

Xinyu L., X. C. (2015). *A review on recent advances in the comprehensive application of rice husk ash*. China: Res Chem Intermed.