

Systematic Literature Review: Application of contaminant materials to enhance soil stabilization, Lima - 2023

Bendezu-Ibazeta Jhonaiker Oscar, Neyra-Torres José Luis, Maestro en Administración de Negocios MBA
Universidad Privada del Norte, Perú, N00168221@upn.pe, jose.neyra@upn.edu.pe

Abstract— In this systematic review, it is analyzed and investigated how the effect of various polluting materials harmful to the environment can be used to improve soil stabilization. Several sources have been analyzed about the use of polluting residues such as rubber, concrete, glass, slag, ashes, polymers, among others. The analyzed results show that the dosages whose addition of Portland cement and sugar cane bagasse ash considerably increase the California Bearing Ratio (CBR) in soils whose classification is silty sand (SM), with variations ranging from 24.5% to 142%. On the other hand, there are analyzed results that show that the dosages whose addition of biomass ash and mining inerts increase the CBR on a smaller scale in soils whose classification is Inorganic Clay (CL) where it only increases from 2.1% to 2.6%, while the Plasticity Index (PI) manages to reduce from 54.7% to 32%. And for the dosages with rubber, in a first study it was observed that the CBR decreased from 26.27% to 22.70% and in a second study it was observed that the CBR increased from 5.2% to 12.2% in soils with CL classification. However, although there were some limitations such as the selection of not very old articles, the ease of access to paid articles and the inclusion of reliable sources that are not related to the proposed topic, the present study provides valuable and solid information that will be useful for future research related to soil stabilization.

Keywords—Soil stabilization, California Bearing Ratio, subgrade improvement, soil, ground improvement.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

Revisión Sistemática de Literatura: Aplicación de materiales contaminantes para potenciar la estabilización de suelos, Lima - 2023

Bendezu-Ibazeta Jhonaiker Oscar, Neyra-Torres José Luis, Maestro en Administración de Negocios MBA
Universidad Privada del Norte, Perú, N00168221@upn.pe, jose.neyra@upn.edu.pe

Resumen– *En la presente revisión sistemática, se analiza e investiga como el efecto de diversos materiales contaminantes perjudiciales para el medio ambiente pueden ser utilizados para mejorar la estabilización de suelos. Se han analizado diversas fuentes acerca del uso de residuos contaminantes como el caucho, concreto, vidrio, escorias, cenizas, polímeros, entre otros. Los resultados analizados demuestran que las dosificaciones cuya adición de cemento portland y ceniza de bagazo de caña de azúcar aumentan considerablemente el California Bearing Ratio (CBR) en suelos cuya clasificación es Arena Limosa (SM), con variaciones que van desde un 24.5% hasta un 142%. Por otro lado, existen resultados analizados que demuestran que las dosificaciones cuya adición de ceniza de biomasa e inertes de minería aumentan el CBR a menor escala en suelos cuya clasificación es Arcilla Inorgánica (CL) donde solamente aumenta de 2.1% hasta un 2.6%, mientras que el Índice de Plasticidad (IP) logra reducir desde un 54.7% hasta un 32%. Y para las dosificaciones con caucho, en un primer estudio se observa que el CBR disminuyó desde un 26.27% hasta un 22.70% y en un segundo estudio se observa que el CBR aumentó desde un 5.2% hasta un 12.2% en suelos cuya clasificación es CL. Sin embargo, aunque se presentaron algunas limitaciones como la selección de artículos no muy antiguos, la facilidad de acceder a artículos de paga y la inclusión de fuentes confiables que no guardan relación con el tema propuesto, el presente estudio brinda una información valiosa y sólida que servirá para futuras investigaciones que estén relacionadas con la estabilización de suelos.*

Palabras clave– *Estabilización de suelos, California Bearing Ratio, mejoramiento de subrasante, soil, ground improvement.*

I. INTRODUCCIÓN

La estabilización del suelo es un procedimiento que generalmente es empleado en las construcciones civiles con la finalidad de obtener las mejores propiedades mecánicas del suelo y a su vez, mejorar la capacidad de carga. Comúnmente, se vienen utilizando materiales estabilizantes de suelos como aditivos orgánicos (obtenidos de fuentes naturales) e inorgánicos (obtenidos de fuentes minerales o compuestos químicos) convencionales.

Por otro lado, muchos países tienen problemas con la generación masiva de residuos, contaminaciones y malas gestiones con estos materiales, los cuales provocan riesgos ambientales en general, por lo que reutilizar estos materiales pueden brindarnos una opción económica favorable y una reducción al impacto ambiental si los estudiamos, tratamos y empleamos correctamente para un fin útil como es el de estabilizar los suelos.

A lo largo de los años, se han realizado investigaciones con diversas patentes con métodos y materiales para lograr dicha estabilización tratando de minimizar el impacto ambiental y maximizando los beneficios, por lo que, en este contexto, nace un enfoque innovador que propone la utilización de materiales contaminantes en la estabilización del suelo. Con la finalidad de reducir la contaminación del medio ambiente, los avances tecnológicos en suelos expansivos nos llevan a analizar y realizar estudios en la generación de materiales novedosos con residuos que brinden mejoras beneficiosas en las propiedades mecánicas de la arcilla [1].

Por otro lado, la generación de residuos de caucho es una preocupación global en la salud humana e impacto ambiental por su efecto negativo que provoca, por lo que se han realizado amplias búsquedas de cómo solucionar este problema para además reaprovechar estos residuos [2]. La implementación y/o fabricación de neumáticos se vuelve una dificultad ya que al ser demasiados, es complicado desecharlos después de utilizarlos, por lo que provoca inconvenientes medioambientales. En el Perú generalmente los neumáticos que ya no son utilizados son destinados a los basureros y presentan peligros por la acumulación de estos, provocando gases, aparición de insectos y posibles incendios [3].

La preocupación y/o interés por indagar e innovar continuamente, se ha encaminado a los investigadores a conseguir metodologías para estabilizar suelos de tipo arcilloso con la finalidad de mejorar el CBR destinados a la pavimentación, donde la aplicación de ceniza de cáscara de arroz beneficia a las propiedades de este tipo de suelo tanto ambiental y económicamente [6]. De igual manera, evaluar los comportamientos de los suelos arcillosos con la adición de escoria de acero para mejorar la subrasante vial, es beneficiosa con la correcta dosificación a implementar, lo cual nos lleva a un CBR óptimo destinado para vías de gran envergadura [4].

Un suelo expansivo puede provocar daños de alto grado, tal como sucedió en la ciudad de San José de Cúcuta (Colombia), se presentaron más de cien viviendas dañadas a causa de este tipo de suelo, por lo que la adición de cenizas volantes logró reducir el índice de plasticidad y estabilizar el suelo [15]. De igual manera, la estabilización de suelos con la adición de cenizas obtenidas por la quema de madera y de carbón para un tipo de suelo arcilloso. Una dosificación óptima

de estas cenizas, puede provocar un aumento considerable del CBR [11].

Los residuos mineros de carbón por lo general, generan diversas contaminaciones que provocan un impacto ambiental en el medio ambiente y de igual manera, a la salud humana, por lo que con el objetivo de compensar dicho impacto ambiental por la extracción de los materiales de la minería de carbón, se plantea estabilizar los suelos con fines de pavimentación, donde se menciona que se mejoran los suelos y logran reducir los costos, además se afirma que al ser tratados y aplicando dosificaciones óptimas, se podrían utilizar en afirmados, subbase y/o terraplén [7].

Existe una amplia variedad de tipos de suelos, por lo que en una construcción de obra civil se deben realizar estudios previos para obtener y/o saber las propiedades del suelo. En la provincia de Manabí (Ecuador) se tienen distintos tipos de suelo, en donde predomina más el tipo de suelo arcilloso, además, la presencia de estos suelos ha provocado grietas de más de 10 centímetros (cm.) en el pavimento, por lo que surge la necesidad de estabilizarlos. Donde se demuestra que al añadir una dosificación de asfalto puede mejorar el tipo de suelo reduciendo la humedad, disminuyendo el esponjamiento y haciendo que el suelo obtenga un mejor compacto [10].

Los tipos de suelos que conllevan alta plasticidad y alto contenido de arcillas, son los que poseen un comportamiento que demuestran una baja resistencia, cambios volumétricos y deformaciones, por lo que con la finalidad de mejorar las vías terciarias del municipio de Ocaña (Colombia), se plantean propuestas de añadir materiales cementantes para mejorar su estabilidad [13]. Al igual que con las cenizas volantes como escoria de alto horno granulada molida y algunos otros aditivos, mejoran las propiedades de resistencia de los suelos de tipo blando, por otro lado, se afirma que, en diversas construcciones de ingeniería civil, los suelos que resultan blandos o débiles, a menudo se logran estabilizar con la adición de cemento [23].

Por otro lado, los residuos plásticos en forma de poliamida en polvo provocados en la industria de la impresión 3D, lograron reducir el índice de plasticidad lo que nos conlleva a una mejor trabajabilidad del suelo y aumento de la resistencia [12]. Sin embargo, así como se pueden utilizar materiales industriales, se pueden utilizar materiales naturales como la zeolita para estabilizar los suelos. Logrando reducir el índice plástico en suelos arcilloso expansivos [20].

La ceniza de bagazo de caña de azúcar es un desperdicio que se puede localizar por todas partes, y muy aparte de los problemas ambientales por los desechos abundantes que se vienen produciendo, se vienen estudiando e investigando reutilizaciones de residuos como la ceniza de bagazo de caña de azúcar para lograr reducir el índice de plasticidad y reducir el porcentaje de hinchamiento, ya que su contenido de sílice ayuda

a mejorar el rendimiento en la estabilización de suelos de tipo arcilloso. Además de reducir el impacto negativo enfocado en edificaciones de construcción civil [18].

Por lo que, el uso de materiales contaminantes que fueron propuestos por diversos autores puede aportar a la estabilización del suelo, y aunque la propuesta pueda parecer contradictoria, muchos estudios generales han demostrado que algunos compuestos químicos, como la utilización de residuos industriales, pueden tratarse y utilizarse de manera controlada para así lograr mejorar la calidad y resistencia del suelo. Se debe recalcar, además, que estos materiales que resultan ser contaminantes y/o dañinos para el medio ambiente, cuando se añaden en dosificaciones estudiadas, adecuadas y bajo un manejo profesional, pueden mejorar las capacidades de carga y mejorar la estabilidad del suelo a largo plazo. Sin embargo, esta investigación plantea lo siguiente:

LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN ES:

¿Cuál es la aplicación de materiales contaminantes para potenciar la estabilización de suelos, Lima – 2023?

EL OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN ES:

Identificar la aplicación de materiales contaminantes para potenciar la estabilización de suelos, Lima – 2023.

II. METODOLOGÍA

Dicha investigación se basa en una revisión sistemática, donde el tipo de estudio científico se enfoca en el objetivo de identificar la aplicación de materiales con materiales contaminantes para potenciar la estabilización de suelos. Las revisiones sistemáticas están consideradas como una de las formas confiables de evidencia científica, por el simple hecho de que se basan en metodologías rigurosas y transparentes, por lo que son precisamente útiles ya que brindan información detallada para la toma de decisiones, optimización de proyectos y mejoramiento en prácticas de diversos aspectos de la ingeniería civil.

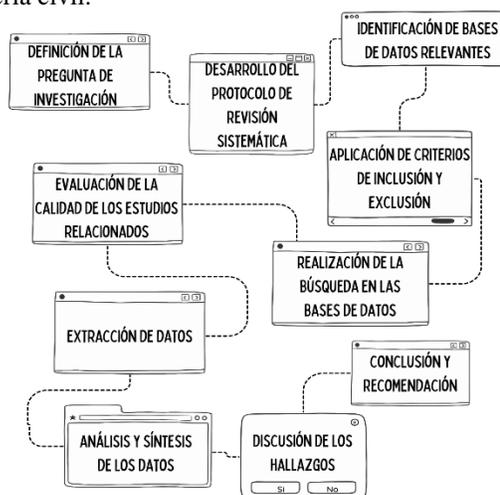


Fig. 1: Proceso de la revisión sistemática. Propio basado en [29].

La presente investigación se desarrolló teniendo en consideración las siguientes bases de datos confiables: Scielo, Dialnet, Semantic Scholar, Redalyc, revistas científicas y repositorios universitarios. Tal como se muestra en la Tabla 1 y Fig. 2, se obtuvieron un total de 196 artículos sin alguna restricción, luego se aplicaron criterios de inclusión y exclusión (que se detallaran a continuación) para llegar a un total de 27 fuentes importantes (24 artículos científicos y 3 tesis) como se muestra en la Tabla 2. Además, cabe recalcar que, se tomó material bibliográfico a través de las palabras clave: estabilización de suelos, California Bearing Ratio, soil, ground improvement, etc. Donde se han incorporado fuentes provenientes de diversos países de habla hispana y de habla inglesa relacionadas a la mejora de suelos través de la adición de materiales contaminantes, y aunque fue complicado lograr comprender la amplia variedad de métodos, normas, idiomas y trabajabilidad, se lograron estudiar, analizar y llegar al objetivo en común de la presente investigación.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN:

- Se consideraron artículos con relación a la estabilización de suelos con materiales contaminantes.
- Se consideraron artículos publicados en fuentes confiables.
- Se consideraron artículos con idioma español e inglés.

CRITERIOS DE EXCLUSIÓN:

- Se han excluido artículos publicados antes del año 2008.
- Se han excluido artículos donde se debía pagar para obtener información.
- Se han excluido artículos sin relación alguna con el tema de investigación.
- Se han excluido artículos que no mostraban información convincente.

Tabla 1		
Resumen de base de datos (general)		
Buscadores/Otros	Artículos	Búsqueda/Palabras clave
Scielo	42	Estabilización de suelos
Dialnet	33	Estabilización de suelos arcillosos
Semantic Scholar	11	Mejoramiento del CBR a través de materiales contaminantes
Redalyc	34	Materiales contaminantes añadidos a suelos arcillosos para mejorar el CBR
Revistas	12	Estabilización de suelos
Repositorios	64	Estabilización de suelos arcillosos

Fuente: Propio.

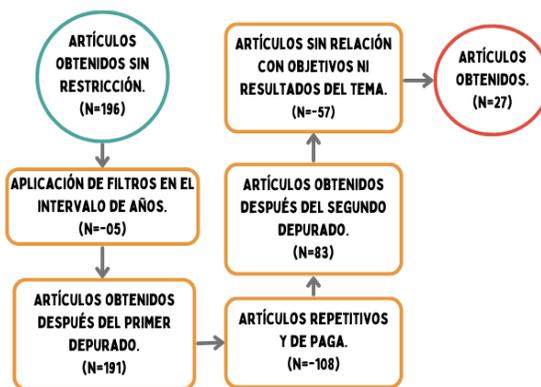


Fig. 2: Diagrama de depuración. Propio.

Tabla 2			
Resumen de base de datos (específico)			
Buscadores/Otros	Artículos	Idiomas	Años
Scielo	6	Español-Inglés	2017-2021
Dialnet	11	Español-Inglés	2015-2022
Semantic Scholar	1	Español-Inglés	2015
Redalyc	3	Español-Inglés	2018-2019
Revistas	2	Español	2020-2022
Repositorios	4	Español	2019-2022

Fuente: Propio.

III. RESULTADOS

A continuación, se mostrarán distintas tablas y figuras donde diversos autores muestran las variadas dosificaciones óptimas que realizaron con la finalidad de estabilizar suelos, demostrando así, cuáles fueron las dosificaciones que obtuvieron mejores resultados. Por otro lado, en la Tabla 3 se detalla la clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) de los artículos para una mayor comprensión de cómo actúan ante las diversas dosificaciones propuestas por los autores de cada artículo.

Tabla 3	
Clasificación SUCS de los artículos	
Clasificación SUCS	Artículos
Arcilla inorgánica (CL)	[3], [6], [14], [17], [19], [25], [26] y [21]
Arena Limosa (SM)	[9] y [8]
Limo inorgánico orgánico (MH)	[5]
Arcilla inorgánica orgánica (CH)	[16], [24] y [27]
Grava arcillosa (GC)	[3]
Suelo arenoso	[22]

Fuente: Propio.

En la Tabla 4, se muestran 4 artículos donde tienen en común la adición de cenizas de distintos materiales tratados para lograr la estabilización del suelo. Se observa que el artículo [6] no menciona el CBR del suelo natural, pero que al añadir 7.5% de ceniza de cáscara de arroz (CCA) obtiene así un CBR para suelo estabilizado de 134%; el artículo [9] presenta un CBR de 24.5% del suelo natural y que al añadir el 3% de la combinación de 50% de cemento portland (CP) y 50% de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) aumenta el CBR hasta un 142%; el artículo [14] presenta un CBR de 4.3% del suelo natural y que al añadir el 12% de ceniza de cáscara de arroz (CCA) aumenta el CBR hasta un 7%; finalmente el artículo [17] presenta un CBR de 7.2% del suelo natural y que al añadir 8% de ceniza de mazorca de maíz (CMM) aumenta el CBR hasta un 19.1%.

Tabla 4			
Dosificaciones y CBR en estudios de estabilización de suelo			
Nº	Dosificación	CBR (suelo natural)	CBR (suelo estabilizado)
[6]	7.5%CCA	No menciona	134%
[9]	3% de 50%CP+50%CBCA	24.5%	142%
[14]	12%CCA	4.3%	7%
[17]	8%CMM	7.2%	19.1%

Fuente: Propio basado en [6], [9], [14] y [17].

En la Tabla 5, se muestran 5 dosificaciones distintas del artículo [19], donde se muestra un CBR global del suelo natural de 2.1%. Se demuestra que al añadir 7% de ceniza de biomasa (CDB) obtiene un CBR de 15.3%; para una dosificación de 4% de ceniza de biomasa (CDB) y 1% de cal obtiene un CBR de 77%; para una dosificación de 2% de cal obtiene un CBR de 144.8%; para una dosificación de 2% de ceniza de biomasa (CDB) y 4% de inertes de minería (IDM) obtiene un CBR de 2.6%; y para una dosificación de 1% cal y 2% de cenizas de térmica (CDT) obtiene un CBR de 56.6%.

Tabla 5			
Dosificaciones y CBR en estudios de estabilización de suelo			
Nº	Dosificación	CBR (suelo natural)	CBR (suelo estabilizado)
[19]	7%CDB	2.1%	15.3%
	4%CDB+1%Cal		77%
	2%Cal		144.8%
	2%CDB+4%IDM		2.6%
	1%Cal+2%CDT		56.6%

Fuente: Propio basado en [19].

En la Tabla 6, se muestran 5 artículos donde proponen distintas dosificaciones para estabilizar el suelo. El artículo [5] presenta un CBR de 7% del suelo natural y añadiendo el 6% de cal aumenta el CBR hasta un 45.3%; el artículo [8] presenta un CBR de 30% del suelo natural y añadiendo el 4% de lodos aceitosos (LA) aumenta el CBR hasta un 52%; el artículo [22] presenta un CBR de 24.29% del suelo natural y añadiendo el 9% de cemento aumenta el CBR hasta un 147.7%; el artículo [25] presenta un CBR de 7.8% del suelo natural y añadiendo el 3% de polímeros reciclados (PR) aumenta el CBR hasta un 8.6%; y el artículo [26] presenta un CBR de 5.6% del suelo natural y añadiendo el 12% de bolsas de polietileno fundido (BPF) aumenta el CBR hasta un 9.9%.

Tabla 6			
Dosificaciones y CBR en estudios de estabilización de suelo			
Nº	Dosificación	CBR (suelo natural)	CBR (suelo estabilizado)
[5]	6%Cal	7%	45.3%
[8]	4%LA	30%	52%
[22]	9%Cemento	24.29%	147.7%
[25]	3%PR	7.8%	8.6%
[26]	12%BPF	5.6%	9.9%

Fuente: Propio basado en [5], [8], [22], [25] y [26].

En la Tabla 7, el artículo [3] muestra tres calicatas donde se observa que la primera y segunda calicata tienen un tipo de suelo Grava Arcillosa (GC) y la tercera calicata tiene un tipo de suelo Arcilla Inorgánica (CL), por lo que por cada calicata se realizaron 3 dosificaciones con caucho, demostrando así que, en el primera calicata (C-1) presenta un CBR de suelo natural de 26.27% y que al estabilizarlo con 5%caucho obtiene 22.70%, con 10% caucho obtiene 22.50% y con 15%caucho obtiene 20.10%; en la segunda calicata (C-2) presenta un CBR de suelo natural de 34.06% y que al estabilizarlo con 5%caucho obtiene 30.78%, con 10%caucho obtiene 29.60% y con 15%caucho obtiene 28.50%; y en la tercera calicata (C-3) presenta un CBR de suelo natural de 5.20% y que al estabilizarlo con 5%caucho obtiene 8.50%, con 10%caucho obtiene 12.20% y con 15%caucho obtiene 10.40%.

Tabla 7			
Dosificaciones y CBR en estudios de estabilización de suelo			
Nº	Dosificación	% CBR (suelo natural)	% CBR (suelo estabilizado)
[3]	5% caucho	26.27% (GC)	22.70%
	10% caucho		22.50%
	15% caucho		20.10%
	5% caucho	34.06% (GC)	30.78%

	10% caucho		29.60%
	15% caucho		28.50%
	5% caucho	5.20% (CL)	8.50%
	10% caucho		12.20%
	15% caucho		10.40%

Fuente: Propio basado en [3].

Finalmente, en la Tabla 8 se muestran 4 dosificaciones distintas donde se detallan las resistencias a la compresión del suelo natural y del suelo estabilizado. El artículo [16] presenta una resistencia a la compresión del suelo natural de 3.6 kgf/cm² y añadiendo 10% de suelo - polímero obtiene una resistencia a la compresión de 2.5 kgf/cm²; el artículo [21] presenta una resistencia a la compresión del suelo natural de 5.23 kgf/cm² y añadiendo 4% de aceite residual (AR) obtiene una resistencia a la compresión de 7.61 kgf/cm²; el artículo [24] presenta una resistencia a la compresión del suelo natural de 1.18 kgf/cm² y añadiendo 8% de cal, 6% de cenizas volantes (CV) y 2% de escoria de acero (EA) obtiene una resistencia a la compresión de 19.42 kgf/cm²; y el artículo [27] presenta una resistencia a la compresión del suelo natural de 2.55 kgf/cm² y añadiendo 6% de cemento y 5% de ceniza de aserrín (CDA) obtiene una resistencia a la compresión de 107.76 kgf/cm².

Tabla 8			
Dosificaciones y resistencias en estudios de estabilización de suelo			
N°	Dosificación	Resistencia (suelo natural)	Resistencia (suelo estabilizado)
[16]	10% Suelo - Polímero	3.6 kgf/cm ²	2.5 kgf/cm ²
[21]	4% AR	5.23 kgf/cm ²	7.61 kgf/cm ²
[24]	8% Cal+6% CV+2% EA	1.18 kgf/cm ²	19.42 kgf/cm ²
[27]	6% Cemento+5% CDA	2.55 kgf/cm ²	107.76 kgf/cm ²

Fuente: Propio basado en [16], [21], [24] y [27].

A continuación, se muestra que en la figura 3, figura 4, figura 5 y figura 6 que tanto aumentaron los CBR de los suelos que no han sido estabilizados respecto de los suelos que han sido estabilizados de la tabla 4, tabla 5, tabla 6 y tabla 7 respectivamente con las dosificaciones correspondientes ya mencionadas mediante barras. Mientras que, por otro lado, en la figura 7 se muestra que tanto han disminuido o aumentado las resistencias a la compresión de la tabla 8 de los suelos que no han sido estabilizados respecto de los suelos que han sido estabilizados.

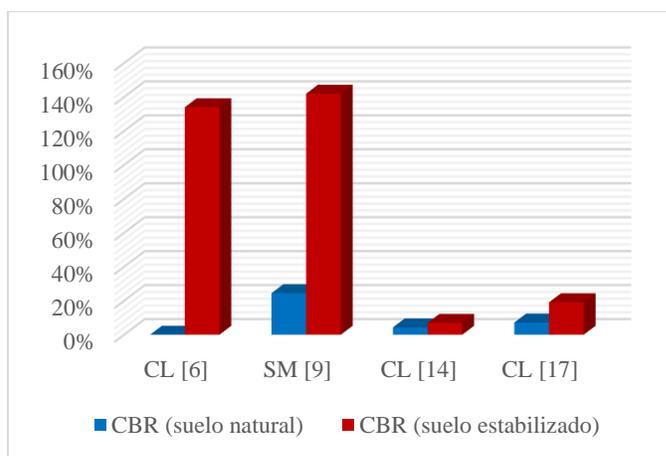


Fig. 3: Gráfica comparativa de la Tabla 4. Propio basado en [6], [9], [14] y [17].

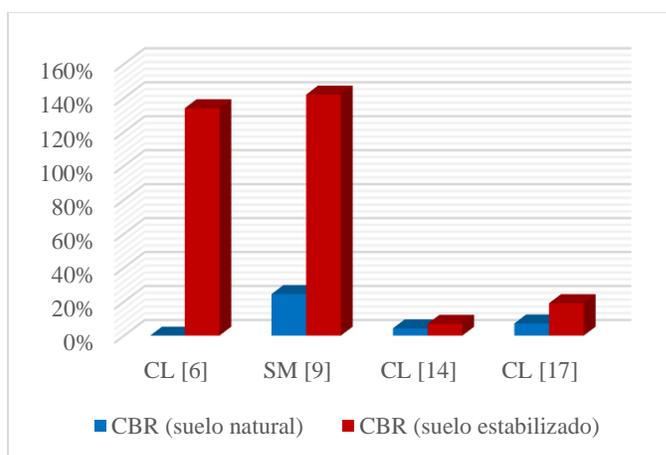


Fig. 4: Gráfica comparativa de la Tabla 5. Propio basado en [19].

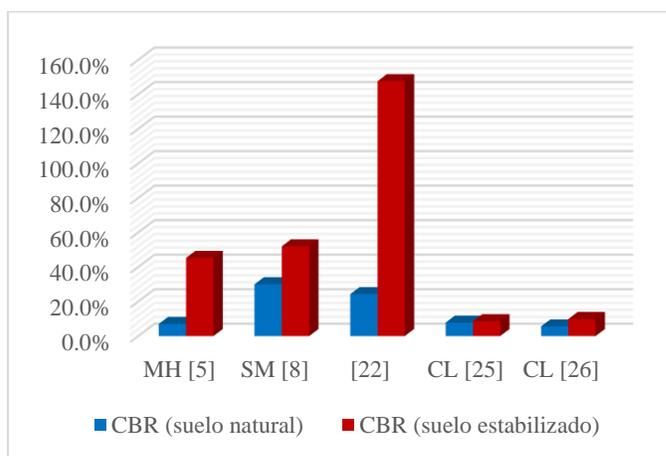


Fig. 5: Gráfica comparativa de la Tabla 6. Propio basado en [5], [8], [22], [25] y [26].

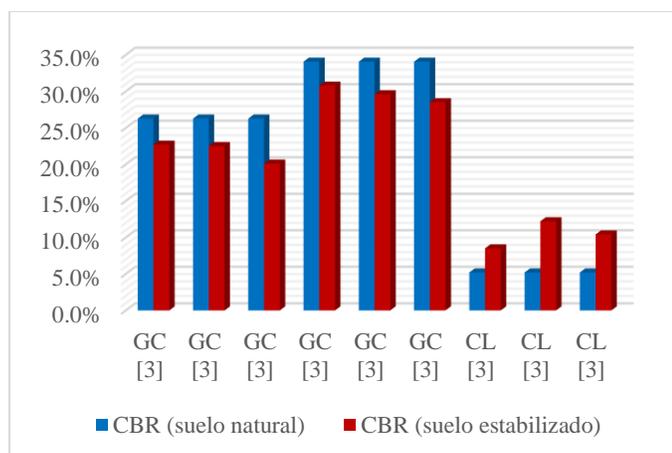


Fig. 6: Gráfica comparativa de la Tabla 7. Propio basado en [3].

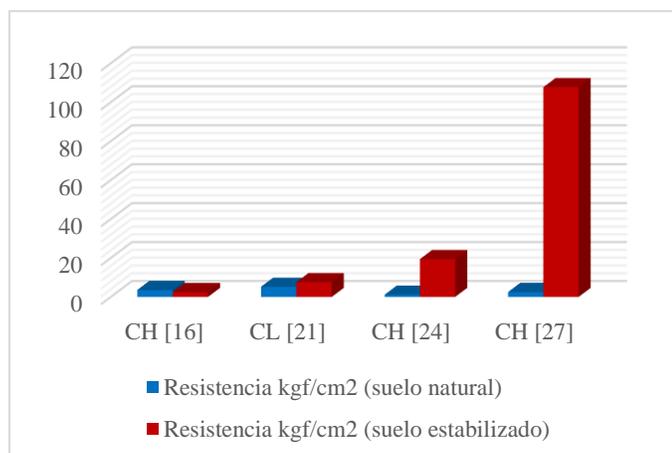


Fig. 7: Gráfica comparativa de la Tabla 8. Propio basado en [16], [21], [24] y [27].

Por otro lado, a continuación, se mostrarán las siguientes tablas donde contendrán los índices de plasticidad (IP) inicial del suelo natural y los índices de plasticidad (IP) final del suelo estabilizado de los resultados que ya fueron mostrados.

En la Tabla 9 se muestra como las 5 dosificaciones ya mencionadas han influido en los índices de plasticidad respecto de los suelos en estado natural y de los suelos estabilizados. En el artículo [6] no menciona el índice de plasticidad (IP) inicial del suelo natural y tampoco menciona el índice de plasticidad (IP) después de estar estabilizado; en el artículo [9] se afirma que inicialmente no se presenta (N/P) rasgos de IP en el suelo natural y mucho menos luego de estabilizar el suelo; en el artículo [14] menciona que el suelo natural presenta un IP de 12.3%, sin embargo no menciona cuanto logró reducir o aumentar el IP después de estabilizar el suelo; y en el artículo [17] menciona que el suelo natural presenta un IP de 10.14% y que al estabilizarlo, presenta un IP de 6.08%.

Dosificaciones e IP en estudios de estabilización de suelo			
N°	Dosificación	% IP (antes)	% IP (después)
[6]	7.5%CCA	No dice	No dice
[9]	3% de 50%CP+50%CBCA	N/P	N/P
[14]	12%CCA	12.3	No dice
[17]	8%CMM	10.14	6.08

Fuente: Propio basado en [6], [9], [14] y [17].

En la Tabla 10 se muestran 5 dosificaciones distintas de [19], donde se muestra un IP global del suelo natural de 54.7%. Se demuestra que al añadir la primera dosificación el IP reduce a 29.4% de suelo estabilizado; al añadir la segunda dosificación el IP reduce a 18.5% de suelo estabilizado; al añadir la tercera dosificación el IP reduce a 13.3% de suelo estabilizado; al añadir la cuarta dosificación el IP reduce a 32% de suelo estabilizado; y al añadir la quinta dosificación el IP reduce a 20.7% de suelo estabilizado.

Dosificaciones e IP en estudios de estabilización de suelo			
N°	Dosificación	% IP (antes)	% IP (después)
[19]	7%CDB	54.7	29.4
	4%CDB+1%Cal		18.5
	2%Cal		13.3
	2%CDB+4%IDM		32
	1%Cal+2%CDT		20.7

Fuente: Propio basado en [19].

En la Tabla 11 se muestran 5 dosificaciones distintas, donde el artículo [5] menciona que el suelo natural presenta un IP de 15% y que al estabilizarlo, presenta un IP de 13.46%; en el artículo [8] menciona que el suelo natural presenta un IP de 8% y que al estabilizarlo, presenta un IP de 7%; en el artículo [22] no menciona el IP inicial del suelo natural y tampoco menciona el IP después de estar estabilizado; en el artículo [25] menciona que el suelo natural presenta un IP de 8.03%, sin embargo no menciona cuanto logró reducir o aumentar el IP después de estabilizar el suelo; en el artículo [26] menciona que el suelo natural presenta un IP de 13.55% y que al estabilizarlo, presenta un IP de 13.65%.

Dosificaciones e IP en estudios de estabilización de suelo			
N°	Dosificación	% IP (antes)	% IP (después)
[5]	6%Cal	15	13.46

[8]	4%LA	8	7
[22]	9%Cemento	No dice	No dice
[25]	3%PR	8.03	No dice
[26]	12%BPF	13.55	13.65

Fuente: Propio basado en [5], [8], [22], [25] y [26].

En la Tabla 12 se muestran 3 muestras de calicatas generales, ya que en el artículo [3] se muestran los IP general para cada uno, demostrando así, que la calicata 1 (C-1) menciona que el suelo natural presenta un IP de 13%, la calicata 2 (C-2) menciona que el suelo natural presenta un IP de 7% y la calicata 3 (C-3) menciona que el suelo natural presenta un IP de 18%, por otro lado, [3] no menciona que tanto se lograron reducir o aumentar los IP de cada una de las calicatas.

Tabla 12			
Dosificaciones e IP en estudios de estabilización de suelo			
N°	Muestra	% IP (antes)	% IP (después)
[3]	Calicata 1	13%	0%
[3]	Calicata 2	7%	0%
[3]	Calicata 3	18%	0%

Fuente: Propio basado en [3].

En la Tabla 13 se muestran 4 dosificaciones distintas, donde el artículo [16] menciona que el suelo natural presenta un IP de 53.7% y que al estabilizarlo, presenta un IP de 8.2%; en el artículo [21] menciona que el suelo natural presenta un IP de 15.89% y que al estabilizarlo, presenta un IP de 8.11%; en el artículo [24] menciona que el suelo natural presenta un IP de 41%, sin embargo no menciona cuanto logró reducir o aumentar el IP después de estabilizar el suelo; en el artículo [27] menciona que el suelo natural presenta un IP de 37.5%, sin embargo no menciona cuanto logró reducir o aumentar el IP después de estabilizar el suelo.

Tabla 13			
Dosificaciones e IP en estudios de estabilización de suelo			
N°	Dosificación	% IP (antes)	% IP (después)
[16]	10%Suelo-Polímero	53.7	8.2
[21]	4%AR	15.89	8.11
[24]	8%Cal+6%CV+2%EA	41	No dice
[27]	6%Cemento+5%CDA	37.5	No dice

Fuente: Propio basado en [16], [21], [24] y [27].

En las figuras 8, 9, 10, 11 y 12 se muestran que tanto aumentaron o disminuyeron los índices de plasticidad (IP) de los suelos en estado natural y de suelos estabilizados de las tablas 9, 10, 11, 12 y 13 respectivamente con las dosificaciones ya mencionadas mediante barras. Por otro lado, los artículos

que no presenten o no mencionen información del IP, serán considerados con 0%.

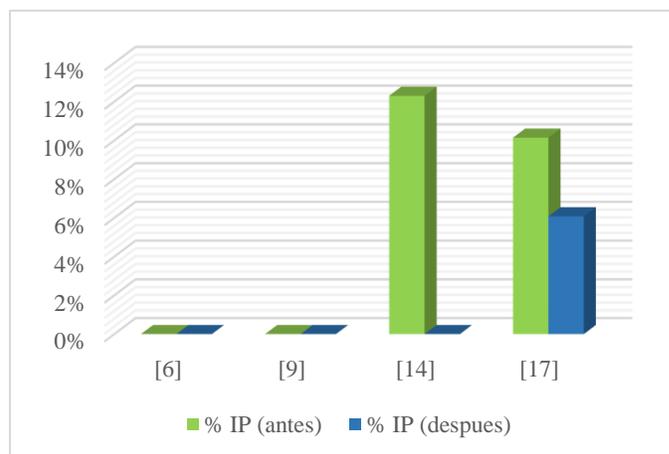


Fig. 8: Gráfica comparativa de la Tabla 9. Propio basado en [6], [9], [14] y [17].

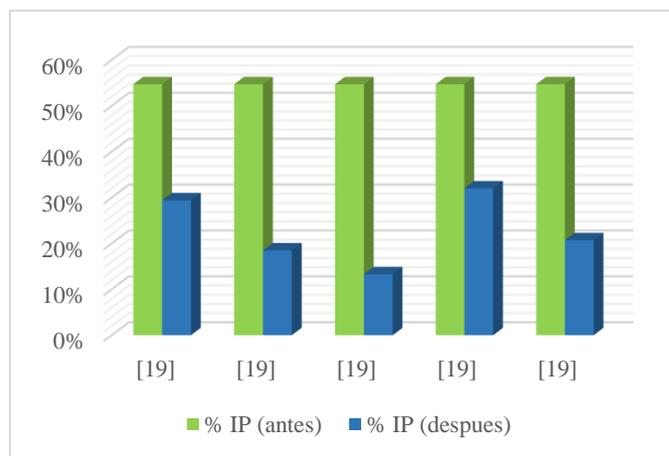


Fig. 9: Gráfica comparativa de la Tabla 10. Propio basado en [19].

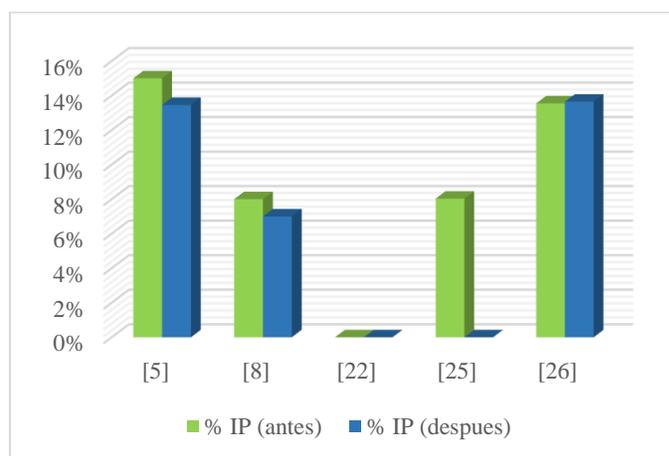


Fig. 10: Gráfica comparativa de la Tabla 11. Propio basado en [5], [8], [22], [25] y [26].

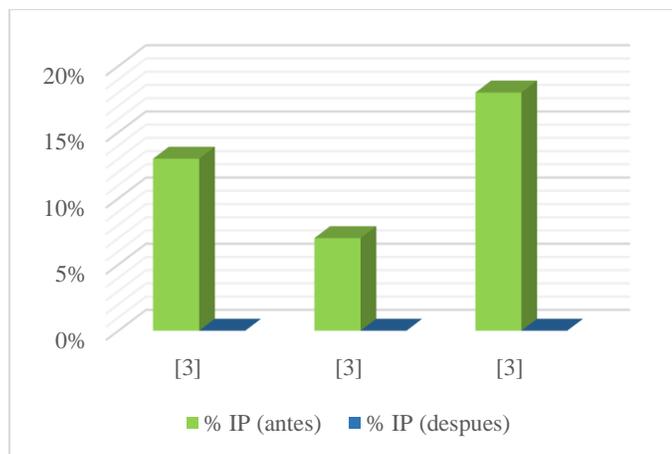


Fig. 11: Gráfica comparativa de la Tabla 12. Propio basado en [3].

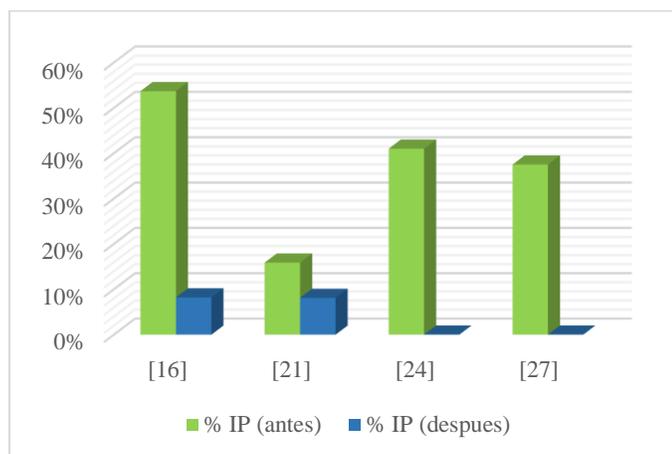


Fig. 12: Gráfica comparativa de la Tabla 13. Propio basado en [16], [21], [24] y [27].

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

DISCUSIÓN:

Como se puede apreciar en la Tabla 4, los artículos [6], [9], [14] y [17] han utilizado dosificaciones con distintos porcentajes de cenizas de cáscara de arroz, cenizas de bagazo de caña de azúcar y cenizas de mazorca de maíz, demostrando así que las 4 dosificaciones con cenizas lograron aumentar considerablemente los CBR de los suelos estabilizados respecto a los de sin estabilizar. Por otro lado, se observa que la dosificación del artículo [9] es la que obtuvo un CBR superior de 142% de suelo estabilizado, mientras que la dosificación del artículo [14] obtuvo un CBR inferior de 7%. Sin embargo, considerando y/o teniendo en cuenta que los artículos mencionados brindan las dosificaciones con fines de pavimentación y según el Manual de Carreteras de la Sección Suelos y Pavimentos del MTC del Perú (2014), se considera subrasante regular a los CBR con valores mayor o igual del 6% y menor al 10% ($10\% < \text{Subrasante Regular} \leq 6\%$) [28], por lo que el artículo [14] estaría dentro de los estándares de subrasante regular, y aunque no es del todo óptimo que se

realicen carreteras con dicho porcentaje de CBR, puede ser utilizada para carreteras donde no haya un volumen de tráfico alto o donde no se esperen cargas muy pesadas.

En la Tabla 5, el artículo [19] muestra 5 dosificaciones distintas en un tipo de suelo Margoso (CL), obteniendo 3 valores de CBR superiores de suelo estabilizado (56.6%, 77% y 144.8%), mientras que los otros 2 valores de CBR de suelo estabilizado obtuvieron un aumento bajo de CBR (2.6% y 15.3%). Si se observan las dosificaciones, los 3 valores más altos tienen porcentajes de Cal en comparación de los 2 valores más bajos, demostrando así que la Cal es un material que brinda efectos beneficiosos para la estabilización de suelos que se complementan con las cenizas de biomasa y cenizas de térmica.

En la Tabla 6 se observa que el artículo [8] alcanzó el CBR de 52% de suelo estabilizado, mientras que el artículo [5] alcanzó el CBR de 45.3% de suelo estabilizado, obteniendo así $[8] > [5]$, sin embargo, el CBR de suelo natural del artículo [5] tiene un valor de 7%, mientras que el CBR del suelo natural del artículo [8] tiene un valor de 30%, por lo tanto, se demuestra una vez más que la dosificación con Cal (6%) aumenta considerablemente el valor de CBR del suelo estabilizado respecto a la dosificación con lodos aceitosos (4%), dejando como diferencia de aumento del artículo [5] un 38.3% y del artículo [8] un 22%.

Por otro lado, en la Tabla 6, se observa que el artículo [25] y el artículo [26] presentaron los aumentos de CBR más bajos de suelo estabilizado (8.6% y 9.9% respectivamente), demostrando así que añadiendo un porcentaje minúsculo del 3% de polietileno reciclado o un porcentaje considerablemente elevado del 12% de bolsas de polietileno fundido no genera un gran aumento del CBR, sin embargo, según el Manual de Carreteras de la Sección Suelos y Pavimentos del MTC del Perú (2014), estos CBR de suelo estabilizados están considerados como subrasante regular ($10\% < \text{Subrasante Regular} \leq 6\%$) [28].

En la Tabla 8, el artículo [16] demuestra que, al aplicar la dosificación para estabilizar el suelo, disminuye la resistencia a la compresión de 3.6 kgf/cm² a 2.5 kgf/cm², sin embargo, el autor menciona que así se haya reducido 1.1 kgf/cm², el suelo sigue siendo apto para construcciones ligeras, por otro lado, según la empresa española INECO (2017), suelos con 2.5 kgf/cm² o 0.245 MPa, son considerados suelos rígidos.

En la Tabla 9 se observa que el artículo [6] no presenta valores del índice de plasticidad (IP) del suelo natural y tampoco los valores del índice de plasticidad (IP) del suelo luego de estabilizarlo, lo cual es un valor importante que se debe tener en cuenta. Además, tal como se ve en la Tabla 4, el artículo [6] no menciona el CBR del suelo natural, solamente el CBR del suelo estabilizado (134%), y aunque es un valor altamente considerable, se requiere saber los valores iniciales

del suelo natural para poder comprobar y/o demostrar que tan efectiva es la dosificación planteada (7% ceniza de cáscara de arroz).

De igual manera sucede con el artículo [14] de la Tabla 9, demuestra un valor inicial de IP del suelo natural de 12.3%, pero no demuestra si se redujo o aumentó el IP del suelo luego de estabilizarlo. Y si se observa en la Tabla 4, el artículo [14] demuestra un aumento débil del 2.7% de CBR con la dosificación del 12% de ceniza de cáscara de arroz, demostrando así que la ceniza de cáscara de arroz podría ser un material que no mejora a grandes rasgos las propiedades del suelo.

En la Tabla 10 se observa que las dosificaciones 2, 3 y 5 fueron las que obtuvieron una reducción considerable del IP y en la Tabla 5 también se observa que estas mismas dosificaciones obtuvieron los valores más altos de CBR luego estabilizar, lo que podría indicar que las dosificaciones con Cal puede ser un material beneficioso al añadirlo en suelos margosos (CL), pero que en los suelos limosos (MH) no produce la misma reacción, ya que en el artículo [5] de la Tabla 11, se observa que el IP inicial del suelo natural es de 15% y después de estabilizarlo obtuvo un IP de 13.46%, reduciendo solo 1.54% al IP.

El artículo [26] de la Tabla 11 se demuestra que con la dosificación de 12% de bolsas de polietileno fundido (BPF) el IP inicial de suelo natural es de 13.55% y luego de estabilizarlo aumenta a 13.65%, lo cual complica la trabajabilidad del suelo; por otro lado, en el artículo [16] de la Tabla 13 se demuestra que con una dosificación de 10% suelo-polímero, el IP inicial de suelo natural es de 53.7% y luego de estabilizarlo reduce el IP a 8.2%, logrando una reducción de 45.5%.

En el artículo [3] de la Tabla 7, se demuestra que los suelos en estado natural de las calicatas C-1, C-2 y C-3 presentan un CBR de 26.27%, 34.06% y 5.20% respectivamente, por lo que al añadir las dosificaciones de 5%, 10% y 15% de caucho a las calicatas C-1 y C-2 (suelos tipo GC) redujeron el porcentaje de CBR, mientras que en la calicata C-3 con las mismas dosificaciones y con tipo de suelo CL, aumentaron con la dosificación de 5% caucho (CBR 8.50%) y 10% caucho (CBR 12.20%); sin embargo, en la calicata C-3, al añadir el 15% de caucho, empezó a reducirse el CBR (10.40%), lo cual podría indicar que el valor óptimo de caucho es el de 10%.

CONCLUSIÓN:

Se puede concluir que, los artículos [3] (calicata C-3, dosificación 1), [14], [19] (dosificación 4), [25] y [26] obtuvieron los valores de CBR más bajos con las dosificaciones planteadas, además, se demuestra que las dosificaciones que incluyen polímeros no consiguieron un aumento significativo del CBR, tal como se muestra en los artículos [25] y [26], por

otro lado, en el artículo [16] que de igual manera contenía polímero en su dosificación, disminuyó 1.1 kgf/cm² en su resistencia a la compresión.

Se puede concluir que, los artículos [3] (calicata C-3, dosificación 1), [14], [25] y [26] probaron mostrar que sus CBR con valores bajos fueron clasificados con subrasante regular según el Manual de Carreteras de la Sección Suelos y Pavimentos del MTC del Perú (2014), sin embargo, estos pueden mejorarse al realizar otros estudios de dosificación para ser considerados como subrasantes buenas, muy buenas o excelentes según el MTC [28].

Se puede concluir que, en los artículos [9] y [22] tienen en común que sus dosificaciones incluyen el cemento, provocando así mejoras considerables en el aumento del CBR para suelo estabilizado, con valores de 142% y 147.7% respectivamente. Y en el caso del artículo [27], la dosificación con cemento aumentó su resistencia de 2.55 kgf/cm² hasta 107.76 kgf/cm².

Se puede concluir que, de igual manera con las dosificaciones con Cal, los artículos [5] y [19] (dosificaciones 2, 3 y 5) obtuvieron mejoras significativas en el aumento del CBR para suelo estabilizado, con valores de 45.3%, 77%, 144.8% y 56.6% respectivamente. Y en el caso del artículo [24], la dosificación con Cal aumentó su resistencia de 1.18 kgf/cm² hasta 19.42 kgf/cm².

Se puede concluir que, la falta de información puede complicar las elecciones de las dosificaciones de estos materiales, ya que no se logra demostrar que tan efectivos son al 100% o en un porcentaje óptimo para su finalidad en obras de construcción civil, tales como se muestra en los artículos [3] (Tabla 12); [6], [14] (Tabla 9); [22], [25] (Tabla 11); y [24], [27] (Tabla 13).

Se puede concluir que las dosificaciones con Cal han mejorado la reducción del índice de plasticidad (IP) de las dosificaciones 2, 3 y 5 del artículo [19] (Tabla 10); mientras que en el artículo [5] de la Tabla 11, se observa que hubo una reducción minúscula del IP con la dosificación con Cal.

Se puede concluir que la adición del 12% de BPF (artículo [26] – Tabla 11), aumentó el IP del suelo natural de 13.55% a un IP de suelo estabilizado de 13.65%, y, por otro lado, se podría deducir que el artículo [25] de la Tabla 11 también podría aumentar el IP del suelo natural (8.03%), lo cual no se puede afirmar ya que no se menciona dicha información.

Se puede concluir que la adición de caucho como estabilizante de suelo, no suele ser muy efectivo en suelos de tipo Grava Arcillosa (GC), ya que en la Tabla 7, en el artículo [3] se demuestra que las dos primeras calicatas tienden a reducir los valores de CBR, mientras que en la tercera calicata con tipo de suelo Arcilla Inorgánica (CL) tiende a subir sus porcentajes

de CBR hasta la dosificación con 10% caucho, ya que, si se añade el 15% caucho, el CBR tiende a disminuir.

Finalmente se concluye que la mayoría de suelos presentados en la investigación predominan en Arcilla Inorgánica (CL). Además, se han estudiado diversas dosificaciones cuya finalidad fue la de estabilizar los suelos, y aunque el uso de dichos materiales contaminantes como: cenizas, escorias, polímeros, entre otros, pudieron haber generado inquietud en temas relacionados al impacto ambiental, se debe recalcar que los beneficios que se obtuvieron se vieron reflejados en las tablas y figuras que se mostraron anteriormente. Por otro lado, se observa que las dosificaciones planteadas por los autores se logran complementar con los diversos tipos de suelos, por lo que es primordial realizar un análisis previo para lograr las mejoras que se alcanzan a observar en la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Perea, D. (2021), Uso del concreto y vidrio reciclado en la capacidad de carga de suelos arcillosos.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8234915>
- [2] Peláez, Velásquez y Giraldo (2017), Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702017000200027&lang=es
- [3] Huamán y Muguera (2019), Influencia del caucho granulado en suelos cohesivos relacionado a la propiedad de la resistencia a la penetración (CBR), 2019.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/44767>
- [4] Ospina, Chaves y Jiménez (2020), Mejoramiento de subrasantes de tipo arcilloso mediante la adición de escoria de acero.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2027-83062020000200185&lang=es
- [5] Gómez, Güillín y Gallardo (2016), Variación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos compresibles estabilizados con material cementante.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6371465>
- [6] Chirinos, Rodríguez y Muñoz (2021), Métodos de estabilización de suelos arcillosos para mejorar el CBR con fines de pavimentación.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8234912>
- [7] Jiménez, Bastidas y Consuegra (2019), Optimización de Residuos Mineros de Carbón para el Mejoramiento de Suelos Viales con Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo.
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v30n4/0718-0764-infotec-30-04-00249.pdf>
- [8] Alarcón, Jiménez y Benítez (2020), Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitosos.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732020000100005&lang=es
- [9] Ojeda, Mendoza and Baltazar (2018), Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352018000200194&lang=es
- [10] García, Loor, Macías and Ortiz (2022), Study of the physical and mechanical behavior of an asphalt-stabilized subgrade of the Rocafuerte – Tosagua road in the province of Manabí.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8537223>
- [11] Fonseca, Becerra y Muñoz (2020), Uso de estabilizadores para suelos arcillosos. Una revisión literaria.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7831536>
- [12] Vijayasimhan, Gokul, Sruthi, Roshan and Mohammed (2021), Experimental study on properties of mechanical resistance of polyamide in clay soil.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7966035>
- [13] Gallardo, Martínez y Muñoz (2020), Caracterización de un suelo plástico para estabilización con cementantes.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7381982>
- [14] Piedra, Vásquez y Arriola (2021), Evaluación de la estabilización de un suelo expansivo utilizando ceniza de cáscara de arroz, distrito de Jaén, Cajamarca, Perú.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8587571>
- [15] Flórez, Caicedo, Zárate y Contreras (2008), Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5461214>
- [16] López, Hernández, Horta, Coronado y Castaño (2010), Polímeros para estabilización volumétrica de arcillas expansivas.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3694127>
- [17] Quispe, D. (2021), Estabilización de suelos expansivos con ceniza de mazorca de maíz en la ciudad del Cusco.
<https://revistas.unsaac.edu.pe/index.php/ACS/article/view/808/1114>
- [18] Millones, Muñoz y Villanueva (2022), La Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar Como Aditivo Estabilizador en Suelos Arcillosos con Fines de Pavimentación.
https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/11801/15381
- [19] Ureña, Azañón, Corpas, Salazar, Ramírez, Rivas, Mochón y Sierra (2015), Construcción de un terraplén con suelo estabilizado mediante el uso de agentes alternativos en la Autovía del Olivar.
<https://socios.aecarretera.com/espacio/wp-content/uploads/revistacarreteras/REVISTA%20CARRETERAS%202023%20web.pdf>
- [20] Hernández A., López, Hernández J. y Horta (2021), Zeolita natural proveniente de Puebla como tratamiento de suelos de la región de Querétaro en vías terrestres: Efectos en su comportamiento plástico.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432021000300008
- [21] Huaquisto S. (2015), Efecto del aceite residual de vehículos motorizados en los factores físicos mecánicos del suelo arcilloso.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5169790>
- [22] Sharafi and Shekarbeigi (2019), Experimental evaluation of the behavior of Sandy Soil – Cement Mixture.
<https://www.redalyc.org/journal/707/70762652002/>
- [23] Karthikeyan and Helen (2020), Stabilization of Soil using Geopolymer: A Review.
<https://www.irjet.net/archives/V7/i10/IRJET-V7I10203.pdf>
- [24] James, Graham and Nagarathinam (2018), Pozzolcinic benefit of fly ash and steel slag blends in the development of uniaxial compressive strength of lime stabilized soil.
<https://www.redalyc.org/journal/4139/413958019001/>
- [25] Zapana R. (2022), Estabilización de suelos arcillosos con polímeros reciclados a nivel de la subrasante de la carretera que une el C.P. de Santa María con la Av. Circunvalación del distrito de San Miguel - San Román – Puno.
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12316>
- [26] Linares R. (2019), Estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante con adición de bolsas de polietileno fundido, Chachapoyas, 2018.
<https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/1800/Linares%20Chavez%20Roiser%20Rene.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [27] James J. (2018), Strength benefit of sawdust/wood ash amendment in cement stabilization of an expansive soil.
<https://www.redalyc.org/journal/4139/413958523004/>
- [28] Manual de Carreteras (2014), Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos: Sección de Suelos y Pavimentos.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-05-14%20Seccion%20Suelos%20y%20Pavimentos_Manual_de_Carreteras_OK.pdf
- [29] Ortega, E. (2010), Metanálisis Revisión Sistemática.
<https://www.aepap.org/sites/default/files/documento/archivos-adjuntos/metanalisis.pdf>