

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL



El uso de Bioenzimas en la estabilización de suelos: una revisión sistemática

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**

AUTOR

Luis Fernando Guerrero Irene

ASESOR

Angel Antonio Ruiz Pico

<https://orcid.org/0000-0003-2638-0593>

Chiclayo, 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.researchgate.net Fuente de Internet	2%
2	link.springer.com Fuente de Internet	1%
3	researchspace.csir.co.za Fuente de Internet	1%
4	"Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns", Springer Science and Business Media LLC, 2021 Publicación	1%
5	"Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019", Springer Science and Business Media LLC, 2021 Publicación	1%
6	Submitted to University of Bristol Trabajo del estudiante	1%
7	Submitted to University of Florida Trabajo del estudiante	<1%

ijritcc.org

Índice

Resumen.....	04
Abstract.....	05
Introducción	06
1. Justificación de la revisión.....	08
2. Formulación de preguntas de investigación	09
3. Definiciones y conceptos básicos	09
3.1. Estabilización de suelos con materiales convencionales	09
3.2. Estabilización de suelos con materiales no convencionales	10
3.3. Bioenzimas	11
3.4. Suelo laterítico	12
3.5. Suelo litomárgico	12
3.6. Suelo expansivo	13
4. Metodología	13
4.1. Proceso de selección de documentos.....	13
4.2. Proceso de la evaluación de la calidad	15
5. Resultados.....	15
5.1. Tratamiento de suelos expansivos con Bioenzimas.....	15
5.2. Tratamiento de suelos arcillosos con Bioenzimas	17
5.3. Tratamiento de suelos lateríticos con Bioenzimas	19
5.4. Tratamiento de suelos litomárgicos con Bioenzimas	20
5.5. Tratamiento de suelos arenosos con Bioenzimas	20
6. Discusión	21
7. Conclusiones	22
Referencias.....	24

Resumen

En el ámbito de la construcción, a menudo nos enfrentamos a terrenos cuyas características no son adecuadas para su aplicación prevista, por lo que resulta imperativo mejorar las condiciones naturales de estos suelos. En la actualidad, la utilización de Bioenzimas en el tratamiento de suelos ha desplazado a los materiales tradicionales como la cal y el cemento; el bajo costo y su alta eficiencia hace que las Bioenzimas sean consideradas como un tema de estudio. Múltiples son los beneficios de este producto, uno de ellos es que al ser un material obtenido de manera natural es eco amigable, es decir, su utilización no representa ningún peligro al medio ambiente. Se ha comprobado que el uso de este aditivo en la construcción de un proyecto disminuye 40% del costo total [1]. Esta investigación es una revisión sistemática, sobre el uso de Bioenzimas en la estabilización de suelos, enfocado en la revisión de literatura técnica publicada en bases de datos entre los años 2019 a 2023. Los estudios han demostrado que el tratamiento con este aditivo aumenta las propiedades de los suelos ya sean propiedades de resistencia, durabilidad, entre otras, el potencial de hinchamiento de suelos expansivos disminuye considerablemente haciendo que se pueda utilizar suelos problemáticos en la construcción de cualquier obra de ingeniería, por otro lado, la resistencia a la deformación de suelos tratados con enzimas aumenta generando ahorro en carreteras de bajo volumen de tránsito.

Palabras clave: Terrazyme; estabilización; CBR; suelos; bioenzima

Abstract

In construction, we often encounter soils with insufficient properties for use, necessitating the improvement of their natural conditions. Currently, the use of bioenzymes in soil treatment has displaced traditional materials such as lime and cement; the low cost and high efficiency make bioenzymes a subject of study. There are multiple benefits to this product, one of which is that, being a material obtained naturally, it is eco-friendly, meaning its use poses no danger to the environment. It has been proven that the use of this additive in the construction of a project reduces the total cost by 40% [1]. This research is a systematic review on the use of bioenzymes in soil stabilization, focusing on the analysis of technical literature published in databases between the years 2019 and 2023. Studies have demonstrated that treatment with this additive enhances the strength and durability properties of soils. The potential for swelling in expansive soils decreases significantly, allowing problematic soils to be used in the construction of any engineering project. Additionally, the resistance to deformation of soils treated with enzymes increases, resulting in cost savings for low-traffic volume roads.

Keywords: Terrazyme; stabilization; CBR; floors; bioenzyme

Introducción

Las carreteras son el eje fundamental en el desarrollo de un país[2], [3]. A medida que aumenta la población surge la necesidad de integrar o edificar nuevas vías de comunicación que faciliten el traslado de personas y productos, sin embargo, muchas veces en la construcción, los ingenieros se encuentran con suelos débiles, de poca resistencia que generan problemas en el proceso constructivo y encarecen el proyecto, además de generar desechos debido a la sustitución del suelo [4]–[14].

En consecuencia, surge la necesidad de transformar o mejorar el suelo no apto para la construcción, en un suelo que cumpla los requerimientos a corto y largo plazo que el proyecto exige[7], [15].

A lo largo de los años, se ha investigado y aplicado una gran variedad de técnicas para tratar la problemática de suelos con características o propiedades que incumplen normativas para su uso en la construcción de infraestructuras de transporte, como carreteras, puentes y aeropuerto, por ello, ha surgido un interés creciente en el uso de tecnologías y técnicas más sostenibles para lograr una estabilización efectiva del suelo[16]–[20], sin comprometer la calidad de la infraestructura y minimizando el impacto ambiental[21], [22].

El mejoramiento de las propiedades de un suelo en la construcción de una carretera es importante debido a que el suelo soportara las cargas del tráfico actual y futuro de la vía [23].

En la última década, el mejoramiento de suelos con enmiendas químicas se ha convertido en una opción eficaz y económica frente a los métodos tradicionales de construcción[22], [24]. La estabilización de suelos con Bioenzimas ha ido ganando reconocimiento a nivel internacional, llegando a desarrollarse múltiples productos con propiedades que favorecen al mejoramiento de suelos, como Renolith, Permazyme, Terrazyme, Fujibeton, entre otros, dichas enzimas demuestran ser rentables y eficientes en al momento de mejorar el suelo [3], [5], [12], [25]. Uno de los aditivos químicos más utilizados en los últimos años en el rubro de la Ingeniería Civil,

en lo que concierne a la estabilización de suelos, es la Bioenzima Terrazyme, la cual se trata de una mezcla de enzimas, minerales y polímeros que generalmente se añade al suelo para mejorar sus propiedades de resistencia y durabilidad [1]. Por otro lado, han surgido técnicas de estabilización de suelos con enzimas obtenidas a base de bacterias[26], lo cual supone un tema de interés en la comunidad científica.

Aunque el uso de Bioenzimas en la estabilización de suelos es una técnica relativamente nueva, se han realizado diversos análisis con el fin de evaluar su efectividad y desempeño en diferentes condiciones de suelo y clima. Estudios realizados demuestran que se puede lograr un ahorro del 40% en el costo total y un 75% en el costo del mantenimiento de una obra vial [1].

Por las razones anteriormente mencionadas, esta investigación está orientada al análisis de la literatura técnica referente a la aplicación de Bioenzimas en la estabilización de suelos. Se muestran los resultados de una revisión sistemática realizada en artículos científicos publicados entre enero de 2019 y setiembre de 2023, sobre el tema, con el objetivo de evaluar su efectividad en la mejora de las propiedades del suelo. Los resultados indican que la aplicación de Bioenzimas puede mejorar significativamente la capacidad portante del suelo, reducir la erosión y mejorar la resistencia a la deformación, lo que la convierte en una alternativa viable para la estabilización de suelos en proyectos de construcción de carreteras y otras infraestructuras.

1. Justificación de la revisión

La estabilización de suelos es una técnica de construcción utilizada para mejorar las propiedades del suelo natural con el fin de aumentar su capacidad de soporte y resistencia[3]. Una inadecuada estabilización de suelos trae consigo problemas como la inestabilidad del terreno, haciendo que el suelo sea propenso a la erosión y sedimentación de partículas afectando la estabilidad de la carretera[27], lo que trae como consecuencia: aumento del riesgo de deslizamientos y hundimientos; degradación rápida del pavimento debido principalmente a las deformaciones en la superficie de rodadura las cuales generan baches y agujeros que reducen su vida útil y aumentan el costo de mantenimiento; pérdida de tiempo y dinero en la construcción; impacto ambiental nocivo perturbando la salud de los individuos por la liberación de partículas finas de polvo[4], [28].

A pesar de la gran variedad de técnicas de mejoramiento de suelos, en la actualidad se siguen utilizando tecnologías que causan un gran impacto ambiental y tienen un alto costo[4], [8], [16], [27]. En este contexto, la tecnología de estabilización de suelos con Bioenzimas ha surgido como una técnica prometedora e innovadora para el tratamiento de suelos problemáticos en la construcción de infraestructuras de transporte[18], [21], [27], [29]–[31].

La Bioenzima es un agente natural estabilizador de suelos que mejora la capacidad portante, la resistencia y la durabilidad del suelo, sin comprometer la calidad de la infraestructura y minimizando el impacto ambiental[15], [32], [33].

Este producto ha tenido una creciente popularidad y uso en la construcción de carreteras, sin embargo, aún se demanda una revisión exhaustiva de la literatura científica existente sobre la estabilización de suelos con enzimas. Es necesario identificar las áreas de aplicación y las situaciones en las que se logran los mejores efectos, así como establecer pautas para la aplicación efectiva y sostenible de esta técnica en la construcción de infraestructuras de transporte.

Por lo tanto, se justifica la necesidad de un artículo de revisión sobre la estabilización de suelos con enzimas, con el objetivo de proporcionar información clara y concisa sobre los beneficios y limitaciones de esta técnica. Esto permitirá a los ingenieros civiles, contratistas y otros profesionales de la construcción tomar decisiones informadas y responsables en relación con la aplicación de esta técnica en proyectos futuros.

2. Formulación de preguntas de investigación

¿Cuánta literatura se ha publicado a nivel mundial sobre la estabilización de suelos con Bioenzimas en la base de datos de Scopus y Science Direct?

¿Cuáles son los beneficios de la utilización de Bioenzimas en el mejoramiento de suelos?

¿Qué tipo de publicaciones existen la estabilización de suelos con Bioenzimas?

¿Hay alguna investigación publicada en español?

3. Definiciones y conceptos básicos

3.1. Estabilización de suelos con materiales convencionales

Con el avance y aumento en la población el ser humano ha ido construyendo infinidad de caminos que conectan los diversos lugares o ciudades, con el avance y desarrollo en vías de comunicación han surgido problemas referentes a la resistencia y características que los suelos utilizados como subrasantes deben tener para soportar lluvias, temperatura, temporadas de hielo y deshielo y como no, soportar el tráfico pesado que transita por esa zona. Han surgido muchos materiales los cuales se han estudiado el comportamiento que tienen para estabilizar los suelos[34]–[39].

La cal es un material que ha tenido grandes resultados en cuanto a la estabilización de suelos, la aplicación de cal ocasiona transformaciones en la estructura y composición de suelos con alta concentración de arcilla, lo cual altera de manera irreversible sus características a corto plazo[34], [40]–[42], además la cal produce reacciones puzolánicas en el suelo lo cual es beneficioso si se habla en términos de mejoramiento del suelo[37], [43]–[45]. El cemento es

otro material utilizado para el mejoramiento de suelos, se ha demostrado que el cemento tiene la capacidad de reducir el hinchamiento de suelos arcillosos[46]. Sin embargo, los estabilizadores como el cemento o la cal las cuales están compuestas a base de calcio al combinarse con el aluminio y sulfato del suelo dan como resultado un mineral expansivo llamado estringita[47], [48], por otro lado, el alto impacto ambiental que ocasionan el cemento y la cal y su alto coste hace que sea factible buscar otras soluciones para la problemática[48].

Se han realizado investigaciones sobre el uso de cenizas volantes en combinación con cemento o cal para mejorar las características del suelo, se obtienen resultados en algunas propiedades como reducción del índice de plasticidad, se pretende reducir costos al utilizar cenizas volantes debido al alto costo del cemento[49].

La escoria de alto horno típicamente obtenida como subproducto en la fabricación de hierro tiene propiedades puzolánicas que en activación con el agua y al mezclarse con el suelo puede mejorar las propiedades técnicas de compactación de los suelos, así como también mejora la resistencia durabilidad y reduce el hinchamiento de suelos expansivos, su utilización esta masificada en países como Reino Unido[50].

Los aglutinantes cementantes como el cemento, la cal, las cenizas volantes y las escorias, mediante el proceso de hidratación, convierten materiales desfavorables en productos cementosos que se utilizan para crear pavimentos con una fuerte cohesión. Estos productos cementosos contribuyen a mejorar la resistencia del suelo[35].

3.2. Estabilización de suelos con materiales no convencionales

Como sustitutos no convencionales para estabilizar suelos se han realizado estudios a diversos materiales como los polímeros, ácidos, enzimas, espumas, emulsiones, entre otros, dichos materiales aumentan la resistencia, aminoran la licuefacción de suelos, se encargan de menorar la permeabilidad y mejoran el comportamiento a la intemperie. Los estabilizadores de suelos convencionales muestran una fragilidad excesiva que puede comprometer la estabilidad de las

estructuras. Los polímeros representan alternativas viables a estos aditivos cuando la naturaleza frágil de su desempeño resulta desventajosa[48].

Los estabilizadores poliméricos se fundamentan en el empleo de resinas poliméricas que actúan como catalizadores de reacciones puzolánicas, manifestando una acción rápida y necesitando dosis mínimas[51].

Los nanomateriales tienen la capacidad de actuar como agentes de estabilización del suelo, mejorando sus propiedades geotécnicas. Esta capacidad se deriva de su alta área superficial específica, lo que facilita una interacción vigorosa con otras partículas. La incorporación de nanopartículas en suelos blandos conlleva un aumento en los niveles de resistencia a la compresión y una disminución en los niveles de plasticidad[48].

3.3. Bioenzimas

La Bioenzima se define como un compuesto orgánico catalizador que tiene la capacidad de acelerar la reacción química sin participar activamente del proceso. En ausencia de la enzima, la reacción tendría lugar a un ritmo más lento y la enzima no se incorpora en el producto final [2], [15], [27], [52], [53]. Las Bioenzimas trabajan en el concepto de reducir el espesor de la capa de agua absorbida [6], [54]. Así mismo, funcionan como agentes en la estabilización de suelos y son ampliamente estudiados, principalmente por ser un material de bajo costo de fabricación y amigable con el medio ambiente, además se puede utilizar en cualquier clima[3], [27].

Dentro del catálogo de Bioenzimas utilizadas en la estabilización de suelos se encuentran aditivos como el Terrazyme que es una enzima líquida de origen orgánico que se elabora a partir de extractos de frutas y vegetales, este producto tiene un color marrón y un aroma que se asemeja al de la melaza, lo más destacado de Terrazyme es que puede ser usado sin requerir el uso de mascarillas ni guantes, además, es fácil de mezclar con agua y para conseguir los mejores resultados es importante diluir Terrazyme con el contenido óptimo de humedad del suelo en el

que se aplicará [32], [55]. Eko Soil el cual trata de un producto compuesto por varias enzimas (multienzimático), el cual consta de lipasa, amilasa y proteasa, Eko Soil se fabrica a partir de agua y proteínas extraídas de plantas[11], [18], [56]. Permzyme es un compuesto orgánico formado de manera natural, similar a proteínas[57]. Renolith es un material que tiene forma líquida y se agrega al suelo al mezclarlo con agua [58], este aditivo produce una reacción exotérmica la cual da como consecuencia una capa densa que se encarga de estabilizar al suelo[3]. Fujibetón es un aditivo inventado en Japón y se utiliza para tratar una gran diversidad de superficies[3].

De manera general la Bioenzima es un aditivo no tóxico y completamente soluble en agua [59], además dado que se requiere de poca cantidad para su utilización en estabilización de suelos, las hace económicas para su aplicación en pavimentos [53].

Dentro de las propiedades que las Bioenzimas modifican o mejoran en el suelo se encuentra la densidad, investigadores advierten que, en aumento de la densidad del suelo, se observa una mejora en la resistencia a deformación del material en presencia de cargas de servicio[13].

3.4. Suelo laterítico

Un suelo laterítico es un tipo de suelo tropical, son carentes en nutrientes y tienen una baja capacidad de retención de agua. El suelo laterítico es de color rojizo, lo cual se debe principalmente a la presencia de contenido de óxido férrico [60]. Los suelos lateríticos experimentan cambios en las propiedades de resistencia bajo la influencia del contenido de humedad [61], en otras palabras, este tipo de suelo pierde su resistencia al corte al saturarse [62].

3.5. Suelo litomárgico

El suelo litomárgico se forma a partir del depósito de sedimentos de arcilla y limo, además son ricos en nutrientes. El suelo litomárgico es de color blanco crema debido al elevado contenido de alúmina y sílice [60].

3.6. Suelo expansivo

Son suelos utilizados principalmente en agricultura, son suelos inadecuados para cualquier tipo de construcción debido a su comportamiento de expansión y contracción [61], [63]. El suelo expansivo al ser arcilloso e impermeable se expande y se vuelve pegajoso durante la estación lluviosa y se contrae durante la estación seca generando grietas profundas [4], [11], [15], [52]. Edificar cualquier obra sobre un suelo expansivo es sinónimo de aumento en costos de construcción[4], [18].

4. Metodología

Para esta revisión literaria se tomaron bases de datos de alto impacto como Scopus y Science Direct, dónde se buscó información sobre el tema a nivel mundial utilizando palabras clave y operadores booleanos; de la información obtenida se pudieron seleccionar un total de 26 artículos.

4.1. Proceso de selección de documentos

La primera búsqueda se realizó a nivel mundial, utilizando lo siguiente, ((stabilization OR terrazyme) AND road AND sustainable), dando como resultado un total de 323 documentos, limitando lo anterior al área de estudio de ingeniería únicamente, ((stabilization OR terrazyme) AND road AND sustainable) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")), se obtiene un total de 199 documentos; la segunda búsqueda de información se planteó de la siguiente manera, ((stabilization AND terrazyme AND permazyme AND renolith AND fujibeton AND ekosoil) AND cbr OR sustainable OR engineering OR soil OR road) dando como resultado 34 documentos y si limitamos al campo de la ingeniería entre los años 2019 al 2023 de la siguiente manera, ((stabilization AND terrazyme AND permazyme AND renolith AND fujibeton AND ekosoil) AND cbr OR sustainable OR engineering OR soil OR road) AND (LIMIT-TO(PUBYEAR, 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019)) AND (LIMIT-TO

(SUBJAREA , "ENGI")), tenemos como resultado 26 documentos.

La búsqueda seleccionada para la realización del presente artículo fue la segunda.

La tabla 1, muestra la distribución por años de las publicaciones entre los años de 2019 a 2023; donde se obtuvieron un total de 22 artículos de la base de datos Scopus, 4 de Science Direct; por otro lado, en la tabla 2 se detalla la búsqueda por palabras clave y en la tabla 3 se muestran los filtros utilizados en la búsqueda.

Tabla 1. Distribución por Años de los artículos encontrados en la base de datos.

Base de datos	Año				
	2019	2020	2021	2022	2023
Scopus	2	4	8	7	1
Science Direct	0	2	1	1	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Contabilidad de artículos por palabras clave y condiciones de búsqueda

Base de datos	Palabras clave	Palabras clave que utilizan operadores booleanos	Años
Scopus	Stabilization, Terrazyme, Road,	(stabilization AND terrazyme) AND cbr	2019-2023
	Sustainable, CBR, Soil	OR sustainable	
Science Direct	Stabilization, Terrazyme, Road,	(stabilization AND terrazyme) AND cbr	2019-2023
	Sustainable, CBR, Soil	OR sustainable	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Artículos seleccionados aplicando filtros de búsqueda

Base de datos	Filtros utilizados	
	Años (2019-2023)	Ingeniería
Scopus	29	22
Science	8	4
Direct		

Fuente: Elaboración propia

4.2. Proceso de la evaluación de la calidad

Se realizó una selección de la literatura más relevante sobre el uso de Bioenzimas en la estabilización de suelos a nivel mundial. Para ello, se ejecutó una lectura detallada de cada uno de los 26 artículos encontrados en el proceso de búsqueda de información y se eligieron aquellos que mejor se ajustan a los criterios de selección. En total, se seleccionaron 22 documentos para la elaboración del presente artículo de revisión.

5. Resultados

5.1. Tratamiento de suelos expansivos con Bioenzimas

A los suelos expansivos se les denomina suelos problemáticos debido a las características y propiedades que complican los procesos de construcción y afectan la estabilidad de las estructuras. Los suelos expansivos desde siempre han sido un desafío para los ingenieros de carreteras, dicho suelo en estado seco tiene resistencia a la compresión sin embargo pierde significativamente su fuerza cuando se encuentra húmedo [64]. La referencia [64] en su investigación observó una reducción en la propiedad de hinchamiento de estos suelos, la adición de la Bioenzima Terrazyme ayudo a reducir en un 1.77, sin embargo, si a esta dosis de enzima añadida se le suma 3% de cal y 3% de ceniza de bagazo este valor aumenta a un 3.25 veces, demostrando de esta manera que se puede trabajar la enzima en combinación con otros productos para mejorar las propiedades del suelo. Se han realizado numerosos estudios sobre el tratamiento de este tipo de suelos para su uso en construcción, lo que se busca es mejorar su

resistencia y disminuir el potencial de expansión. El uso de Bioenzimas influye positivamente en el aumento de resistencia, durabilidad y disminución del hinchamiento.

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de estudios realizados.

Tabla 4. Bioenzimas en suelos expansivos

Bioenzimas en suelos expansivos						
Material	Dosis óptima	CBR	Observación	Resultados	Referencia	
Suelo sin tratar	-	1.12%		El potencial de expansión disminuye del		
Suelo + Terrazyme	300 ml/m ³	2.08%	Se examinaron diferentes cantidades de Terrazyme, siendo administradas en dosis de 100, 200 y 300 ml/m ³ . La dosis más efectiva y recomendada fue de 300 ml/m ³ .	93.16% al 28.6% con la combinación tres, así mismo, aumenta el valor de CBR de 1.12% a 7.21% y se observa una reducción de 3.25 veces el valor del índice de hinchamiento libre.	[64]	
Suelo + Terrazyme + bagazo + cal	300 ml/m ³ , 3%, 3%	7.21%				
Suelo sin tratar	-	4.60%	La dosis de Terrazyme fue de 100 y 200 ml/m ³ en tiempos de curado de 7 y 28 días, así mismo, se realizan estudios para una, dos y tres capas de suelo.	Al tratarse un suelo con la enzima Terrazyme se observa una reducción del pavimento del 21-23%	[68]	
Suelo + Terrazyme	200 ml/m ³	10.00%				
Suelo sin tratar		2.00%	Las cantidades de enzima fueron de 150, 200 y 250 ml/m ³ y los periodos de curado de 7 y 28 días. La dosis óptima fue de 200 ml/m ³	Aumento del valor de CBR de 251% en suelos tratados con la enzima. El UCS aumenta hasta un 420% en suelos tratados.	[61]	
Suelo + Terrazyme	250 ml/m ³	4.80%				
Suelo sin tratar	-	4.57%	Las dosis de enzima utilizadas fueron de 100, 150 y 200 ml/m ³ , siendo 200 ml/m ³ la dosificación óptima. Los tiempos de curado fueron de 7 y 28 días.	El aumento del valor de CBR en un suelo tratado mejora en el orden de 168 a 222%, siendo el tiempo de curado muy importante para alcanzar este valor. El porcentaje de reducción del espesor de un pavimento es de 20-23% con un suelo tratado.	[59]	
Suelo + Terrazyme	200 ml/m ³	14.72%				
Suelo sin tratar	-	0.50%	Se trabajó con diez dosis de Terrazyme (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2 ml) siendo 2 ml la dosificación óptima.	El valor de CBR aumenta gradualmente, con dosis de 2 ml se obtiene un valor máximo. Reducción de 140 a 57% en el índice de hinchamiento.	[52]	
Suelo + Terrazyme	2 ml	5.00%				
Suelo sin tratar		2.09%	Se examinaron dosis de 0.5, 0.75, 1, 1.5 m ³ de suelo por 200 ml de enzima, se observó que la dosis óptima fue de 0.75 m ³ /200ml.	La dosificación de 0.75m ³ /200 ml representa el incremento máximo del 112% a los 14 días de curado en la evaluación UCS de igual manera se produjo un aumento máximo en el CBR.	[69]	
Suelo + Terrazyme	200ml/0.75m ³	4.82%				
Suelo sin tratar	-	4.57%				[62]

Suelo + Terrazyme	250 ml/m ³	16.01%	La dosis de terrazyme fue de 150 y 250 ml/m ³ y un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días, dando como dosis óptima 250 ml/m ³ .	El aumento porcentual de UCS fue de (hasta un 400%) y el aumento porcentual en el valor de CBR está en el rango de (160-250%)	
Suelo sin tratar		3.20%		La resistencia del suelo aumenta con la adición de Terrazyme, el efecto es más predominante a los 0 y 7 días, lo que indica el comportamiento de reacción temprana en presencia de polvo de horno de cemento.	[70]
Suelo + Terrazyme + polvo	2.5%, 12.5%	8.90%	Se empleó polvo de horno de cemento en proporción de (10 - 20%) y porcentaje de enzima de 2.5%.		
Suelo sin tratar	-	-	Se utilizaron dosis de terrazyme de 200ml para 2, 2.5 y 3 m ³ de suelo y se comparó resultados con los de otra bioenzima.	Con un periodo de curado de 21 días se encontró el mayor aumento porcentual en el valor UCS de 131.39% para la dosis de 0.091ml/kg. El terrazyme es más efectivo que DZ-2X.	[54]
Suelo + Terrazyme	0.091 ml/kg	-			
Suelo sin tratar	-	-	Las dosis de enzimas utilizadas fueron de 0.1, 0.2 y 0.3 ml, siendo esta última la dosis óptima.	Disminución del hinchamiento libre diferencial del suelo expansivo tratado del 140%, 129%, 107% y 98%	[25]
Suelo + Terrazyme	0.3 ml	-			
Suelo sin tratar	-	3.25%	La cantidad de Terrazyme fue de 0.01, 0.02 y 0.03 ml en periodos de curado de 7, 15 y 30 días. De las tres dosis se demostró que 0.03 ml de terrazyme es la dosis óptima.	Con la utilización de enzimas disminuye entre un 25 a 40% el espesor del pavimento, lo que se traduce en ahorro de dinero.	[55]
Suelo + Terrazyme	0.03 ml	8.82%			
Suelo sin tratar	-	0.94	La cantidad de Eko Soil fue de 1% a 6% en periodos de curado de 7, 28 y 45 días. De las tres dosis se demostró que 0.2 ml/kg de Eko Soil es la dosis óptima.	Con la utilización de enzimas aumenta la resistencia del suelo con la cantidad 4% de Eko Soil, en cantidades mayores el CBR disminuye.	[11]
Suelo + Eko Soil	0.2 ml/kg	7.8			

Fuente: Elaboración propia

5.2. Tratamiento de suelos arcillosos con Bioenzimas

Los suelos arcillosos se caracterizan por tener una capacidad de carga inadecuada para la construcción de cualquier infraestructura [65], la estabilización enzimática ha demostrado mejorar las propiedades de este tipo de suelos, se han realizado investigaciones que dan como resultado un mejoramiento en las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos [55].

La referencia [66] efectuó una investigación experimental donde compara las propiedades de un suelo virgen (sin tratar) y un suelo tratado con Terrazyme y ceniza de estanque. Se llegó a la conclusión, de que el tratamiento aumenta los valores del ensayo de California Bearing Ratio

por (CBR) siendo ocho veces más que el suelo sin tratar.

En la tabla 5 se detallan los resultados de investigaciones referentes al tema.

Tabla 5. Bionzimas en suelos arcillosos

Bioenzimas en suelos arcillosos					
Material	Dosis óptima	CBR	Observación	Resultados	Referencia
Suelo sin tratar	-	4.10%	Dosis de Terrazyme de 0.05, 0.1 y 0.15 ml/kg, adicionando cal en cantidad de 6, 8 y 10% y cenizas volantes en porcentaje de 10, 20 y 30%.	El valor de CBR aumenta 8.5 veces para la muestra que contiene Terrazyme en 0.1 ml/kg siendo esta la dosis óptima, además el porcentaje óptimo de cal es del 8%	[23]
Suelo + Terrazyme	0.1 ml/kg	35.55%			
Suelo sin tratar	-	4.00%	Cantidad de Terrazyme de 0.01, 0.02 y 0.03 ml y periodos de curado de 7, 15 y 30 días. De las tres dosis se demostró que 0.03 ml de terrazyme es la dosis óptima.	Debido a que la arcilla es un suelo no cohesivo se llega a la conclusión de que la enzima mejora únicamente las propiedades de suelos cohesivos.	[55]
Suelo + Terrazyme	0.03 ml	4.50%			
Suelo sin tratar	-	2.00%	La dosis para el estudio fue de 0.1 ml/kg y los periodos de curado de 7, 14 y 28 días.	El valor UCS después de 28 días de curado el aumenta hasta 2.77 veces, además el valor de CBR aumenta hasta 25 veces más.	[71]
Suelo + Terrazyme	0.1 ml/kg	27.65%			
Suelo sin tratar	-	2.00%	El presente estudio se centra en mejorar las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso utilizando ceniza de estanque y terrazyme en proporciones de 0.04, 0.08 y 0.12 ml/kg.	Los valores de CBR aumentaron con la adición de terrazyme siendo ocho veces más que el suelo sin tratar, siendo 20% de cenizas de estanque y 0.24 ml de terrazyme la dosis óptima.	[66]
Suelo + Terrazyme + ceniza	0.24 ml, 20%	9.70%			
Suelo sin tratar	-	2.65%	Se agregaron dosis de 100, 200 y 300 ml/m ³ de terrazyme, siendo 200 ml/m ³ la dosificación óptima	El coeficiente de permeabilidad de la muestra sin tratar fue de 0.000152cm/s y la muestra tratada fue de 0.000047 cm/s. En el ensayo UCS la dosis D2 obtuvo una fuerza máxima de 3.76 Mpa después de 45 días de curado.	[6]
Suelo + Terrazyme	200 ml/m ³	4.56%			
Suelo sin tratar	-	2.69%	Se agregaron dosis de 5, 7.5 y 10 m ³ /l de bioenzima, siendo la dosis de 7.5 m ³ /l la óptima.	El valor de CBR aumento con la adición de la bioenzima a 28 días fue 2.8 veces el valor del suelo sin tratar. Aumento de CBR hasta una cierta dosis de terrazyme después de ello con un aumento en la dosis se reduce el CBR.	[65]
Suelo + Terrazyme	7.5 m ³ /l	7.79%			
Suelo sin tratar	-	4.68%	La cantidad de enzima utilizada fue de (0.05, 0.1 y 0.15 ml/kg), se observó que la dosis óptima fue 0.1 ml/kg.	La dosis ideal de terrazyme es de 0.1 ml/kg esto a partir de los resultados de los ensayos de CBR; de igual manera que para el ensayo UCS, El valor UCS aumentó de 196.33 kN/m ² a 217.26 kN/m ² .	[72]
Suelo + Terrazyme	0.1 ml/kg	9.79%			

Fuente: Elaboración propia

5.3. Tratamiento de suelos lateríticos con Bioenzimas

Los suelos lateríticos se encuentran en gran parte del mundo y generalmente no cumplen los estándares para ser utilizados en las capas granulares del pavimento [53]. Se han realizado estudios sobre estabilización de suelos lateríticos con estabilizadores tradicionales como el cemento o la cal, sin embargo, estos materiales resultan costosos y perjudiciales con el medio ambiente [62].

La referencia [62] realizó una investigación experimental para estabilizar un suelo laterítico con enzima, resultando en una variación en la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo del suelo, además se produce un aumento en el valor de CBR de la muestra tratada.

Actualmente se cuenta con investigaciones sobre el tema, en la tabla 6 se detalla los estudios realizados sobre el tema.

Tabla 6. Bioenzimas en suelos lateríticos

Bioenzimas en suelos lateríticos					
Material	Dosis óptima	CBR	Observación	Resultados	Referencia
Suelo sin tratar	-	-	Dosis de la bioenzima (0.0019, 0.0023, 0.0028 Y 0.0038%) en peso de la muestra.	A 40°C, la velocidad de reacción enzimática es mejor, lo que conduce a una mayor resistencia. Disminución de la fuerza con el aumento de la temperatura por encima de los 40°C	[53]
Suelo + Terrazyme	0.0023-0.0028%	-	Cemento con diferentes cantidades de 2% (C1) y 3%(C2)		
Suelo sin tratar		3.00%	Las dosificaciones fueron de 150, 200 y 250 ml/m ³ en periodos de curado de 7 y 28 días.	Aumento del valor de CBR de 101% en suelos tratados con la enzima. El UCS aumenta hasta un 132% en suelos tratados.	[61]
Suelo + Terrazyme	250 ml/m ³	7.50%	La dosis óptima fue de 250 ml/m ³		
Suelo sin tratar	-	9.23%	Se utilizó dosis de enzima de 100, 150 y 200 ml/m ³ . 200 ml/m ³ fue la dosificación óptima. Los tiempos de curado fueron de 7 y 28 días.	El aumento del valor de CBR en un suelo tratado mejora en el orden de 50 a 75%, siendo el tiempo de curado muy importante para alcanzar este valor. El porcentaje de reducción del espesor de un pavimento es de 20-23% con un suelo tratado.	[59]
Suelo + Terrazyme	200 ml/m ³	16.22%			
Suelo sin tratar	-	9.00%	Dosis de terrazyme de 200ml por (2, 2.5, 3 y 3.5 m ³), siendo la dosis óptima D1 (200 ml por 2 m ³)	Incremento en el valor UCS de 349% a los 28 días de curado. En la prueba CBR se obtuvo un aumento del 158.8% (de CBR 9% a CBR 23.3%) a los 0 días de curado y un aumento de 277.8% (de CBR 9% a CBR 34%) a los 28 días de curado.	[60]
Suelo + Terrazyme + ceniza	0.24 ml, 20%	23.00%			

Suelo sin tratar	-	9.23%	Se utilizó cantidades de 150 y 250 ml/m ³ , siendo esta última la dosis óptima. El periodo de curado fue de 7 y 14 días.	El aumento de UCS fue de orden del 68.5% y 97.2% para una dosis de 250ml/m ³ después de 7 días y 14 días de curado.	[73]
Suelo + Terrazyme	250 ml/m ³	-			
Suelo sin tratar	-	9.30%	Cantidades de terrazyme de 150 y 250 ml/m ³ en un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días.	El aumento porcentual de UCS fue de (hasta un 135%) y el aumento porcentual en el valor de CBR está en el rango de (39-96%)	[62]
Suelo + Terrazyme	250 ml/m ³	18.13%			

Fuente: Elaboración propia

5.4. Tratamiento de suelos litomárgicos con Bioenzimas

Se ha llevado a cabo investigaciones experimentales sobre la estabilización de suelos litomárgicos adicionando diferentes productos y se han probado diferentes procedimientos, sin embargo, la investigación disponible del tratamiento de estos suelos con bioenzimas es muy limitada.

La referencia [60] realizó un estudio experimental del tratamiento de suelos litomárgicos con adición de la enzima Terrazyme en diferentes dosis, demostrando que la enzima es un agente estabilizador que funciona de manera adecuada, aumenta el valor de CBR y resistencia UCS del suelo.

La tabla 7 detalla el tratamiento de suelos litomárgicos con terrazyme.

Tabla 7. Bioenzimas en suelos litomárgicos

Bioenzimas en suelos litomárgicos					
Material	Dosis óptima	CBR	Observación	Resultados	Referencia
Suelo sin tratar	-	2.00%	Se utilizaron dosis de 200ml por (2, 2.5, 3 y 3.5 m ³), siendo la dosis óptima D1 (200 ml por 2 m ³)	Ganancia de resistencia UCS del 59.13%. Ganancia de CBR inicial de 241.6% y a los 28 días de 491.7%	[60]
Suelo + Terrazyme + ceniza	0.24 ml, 20%	8.00%			

Fuente: Elaboración propia

5.5. Tratamiento de suelos arenosos con Bioenzimas

Estudios demuestran que se puede reducir el espesor de un pavimento con el uso de estabilizantes. [1] realizó un estudio donde comparó un suelo arenoso sin tratar y uno tratado con la bioenzima, demostrando que hubo una mejora en las propiedades de compactación, CBR y el valor de resistencia a la compresión de un suelo estabilizado con terrazyme.

En la tabla 8 se muestra a detalle los resultados de la investigación.

Tabla 8. Bioenzimas en suelos arenosos

Bioenzimas en suelos arenosos					
Material	Dosis óptima	CBR	Observación	Resultados	Referencia
Suelo sin tratar	-	8.00%	Se utilizó una dosis de enzima de 200 ml por 2.2 m ³ de suelo.	Aumento en el valor de CBR del 8% al 13%. La UCS del suelo aumentó de 280 a 410 kN/m ² , por lo que se observa una reducción del espesor de pavimento.	[1]
Suelo + Terrazyme	45.5 ml/0.5 m ³	13.00%			

Fuente: Elaboración propia

6. Discusión

La revisión sistemática se estableció en la búsqueda de diferentes artículos sobre el uso de Bioenzimas en la estabilización de suelos, los resultados muestran una tendencia de aumento en las investigaciones en los últimos 3 años (2020 hasta 2022) y una baja de publicaciones en el último año (2023).

El análisis de artículos se realizó rigurosamente excluyendo aquellas publicaciones que no cumplen con los estándares deseados, además, se utilizaron bases de datos sólidas y confiables, las cuales ya fueron descritas con anterioridad, por lo tanto, se deja en claro que, se ha utilizado la mejor información para la presente investigación.

Si bien se ha buscado información sobre el tema en todo el mundo, la mayor parte de publicaciones tienen sus orígenes en el continente asiático, siendo India el país con más publicaciones sobre el tema.

El mejoramiento del suelo con Bioenzimas aumenta valores de CBR, incrementa los valores de la resistencia no confinada del suelo por sus siglas UCS, disminuye el potencial de hinchamiento de suelos problemáticos y reduce la permeabilidad, dando como consecuencia un suelo resistente y durable. Con las Bioenzimas se ha comprobado que son eficientes en el mejoramiento de las propiedades de suelos expansivos, arcillosos, arenosos, litomárgicos y lateríticos.

En las investigaciones se plantean diferentes dosificaciones para el uso de la enzima, sin

embargo, la mayoría concuerda que el tiempo de curado es directamente proporcional a la resistencia final alcanzada, es decir, a mayor tiempo de curado el suelo experimenta un incremento en su resistencia final.

Un estudio realizado muestra que la combinación de Nanopartículas y enzima con un porcentaje de cemento de 1% es eficaz en el tratamiento de arcillas blandas las cuales por medio del tratamiento se convierten en arcillas rígidas, dando como consecuencia un ahorro en el costo de ejecución y mantenimiento de pavimentos [67].

7. Conclusiones

En las búsquedas realizadas se encontraron un total de 26 artículos de los cuales el 84.62% pertenecen a la base de datos Scopus y el 15.38% a la base de datos Science Direct, dichos artículos posteriormente fueron analizados y se excluyeron aquellas publicaciones que no guardan relación con el tema en estudio, finalmente se realizó el análisis exhaustivo de un total de 22 artículos científicos los cuales fueron seleccionados rigurosamente.

Durante el proceso de elección de la información se descartaron 3 documentos de la base de datos Scopus y 1 de la base de datos Science Direct debido a que no guardaban relación con el tema tratado en el presente artículo de revisión.

En los últimos años se han investigado nuevos métodos en la industria de la construcción mediante el empleo de productos biológicos con el fin de modificar las propiedades estructurales de los suelos. Estos cambios incluyen la mejora de la resistencia, estabilidad de volumen, durabilidad y permeabilidad mediante el uso de técnicas de ingeniería innovadoras. La utilización de tecnología de estabilización de base biológica, como los bioestabilizadores, presenta un potencial para disminuir la dependencia de opciones convencionales como el cemento y la cal, cuyos procesos de producción generan una mayor carga ambiental y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). De esta manera, se busca preservar el medio ambiente y los recursos naturales.

El uso de Bioenzimas aumenta los valores de CBR y valores del ensayo de resistencia a la compresión no confinada con una dosis óptima de 200 ml de enzima por cada m³ de suelo, siendo el tiempo de curado un factor importante para que el suelo llegue a valores altos en estos ensayos, a mayor tiempo de curado trae como consecuencia un aumento en la resistencia del suelo.

En suelos expansivos, conocidos por ser suelos problemáticos para la construcción, se ha descubierto que la propiedad del potencial de expansión en suelos tratados con Bioenzimas disminuye, lo que indica que el tratamiento con el aditivo es eficiente y soluciona el problema que se presenta en estos suelos.

Se realizó una búsqueda de información a nivel mundial sin restricciones, sin embargo, la mayor parte de publicaciones realizadas en bases de datos como Scopus y Science Direct son de procedencia hindú, por lo tanto, se observa una nula participación de otros países, siendo que es un tema de gran importancia en países en vías de desarrollo.

Referencias

- [1] A. S. Chandana, S. Marathe, and B. V. Kiran Kumar, "Pavement Design Using TerraZyme Stabilized Soil," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023, pp. 917–934. doi: 10.1007/978-981-19-1862-9_59.
- [2] A. AbouKhadra, A. F. Zidan, and Y. Gaber, "Experimental evaluation of strength characteristics of different Egyptian soils using enzymatic stabilizers," *Cogent Eng*, vol. 5, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1517577.
- [3] S. Shivhare and H. Mohanan, "A review on subgrade soil stabilization using bio enzymes," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 16, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.1007/s12517-023-11257-9.
- [4] A. O. Owino and Z. Hossain, "Correlation between one-dimensional consolidation coefficients and different basalt fiber lengths and RHA-cement contents in fiber-reinforced stabilized expansive soils," *Soils and Foundations*, vol. 63, no. 4, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.sandf.2023.101351.
- [5] A. E. Fazal, K. J. Thyagaraj, S. Aravindan, S. F. Shafi, and M. Shahzaib, "Stabilization of Residual Soil from Wastewater Treatment Plant by using Bio-Enzyme (Terrazyme)," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Aug. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/822/1/012032.
- [6] P. Kushwaha, A. S. Chauhan, and B. L. Swami, "Experimental investigation on stabilization of subgrade soil using bio-enzymatic additive for pavement construction," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 7, no. 2, Apr. 2022, doi: 10.1007/s41062-022-00752-9.
- [7] G. P. Ganapathy *et al.*, "Bio-Enzymatic Stabilization of a Soil Having Poor Engineering Properties," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 401–409, May 2017, doi: 10.1007/s40999-016-0056-8.
- [8] G. N. Eujine, S. Chandrakaran, and N. Sankar, "The engineering behaviour of enzymatic lime stabilised soils," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, vol. 170, no. 1, pp. 1–11, Feb. 2017, doi: 10.1680/jgrim.16.00014.
- [9] M. Kothuri and C. P. Devatha, "Effect of Bioprecipitation and Ferrochrome Ash Stabilization on the Strength of Black Cotton Soil," *Environmental Processes*, vol. 10, no. 2, Jun. 2023, doi: 10.1007/s40710-023-00632-z.
- [10] N. Mall and K. Venkatesh, "Soil Stabilization Using Bio Enzyme," *National Academy Science Letters*, 2023, doi: 10.1007/s40009-023-01338-4.

- [11] S. S. Kushwaha, D. Kishan, and N. Dindorkar, "Stabilization Of Expansive Soil Using Eko Soil Enzyme For Highway Embankment," 2018. [Online]. Available: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853
- [12] V. M. Ramdas, P. Mandree, M. Mgangira, S. Mukaratirwa, R. Lalloo, and S. Ramchuran, "Review of current and future bio-based stabilisation products (enzymatic and polymeric) for road construction materials," *Transportation Geotechnics*, vol. 27. Elsevier Ltd, Mar. 01, 2021. doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100458.
- [13] M. Hoy *et al.*, "Improved fatigue properties of cement-stabilized recycled materials – Lateritic soil using natural rubber latex for sustainable pavement applications," *Transportation Geotechnics*, vol. 40, May 2023, doi: 10.1016/j.trgeo.2023.100959.
- [14] S. Sinha, S. K. Mahto, H. Chakravarty, and S. Saurav, "An Assessment of Strength, Durability and Economic Benefits of Stabilized Silty Soil for Construction of Low Volume Roads," *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2023, doi: 10.1007/s42947-022-00270-y.
- [15] M. Nadeem *et al.*, "Evaluation of engineering properties of clayey sand bio-mediated with terrazyme enzyme," *Front Mater*, vol. 10, 2023, doi: 10.3389/fmats.2023.1195310.
- [16] A. Kassa, S. Raihan, K. Hayano, B. Nguyen Phan, H. Yamauchi, and Y. Mochizuki, "Novel method for evaluating water absorption and retention of waste-based stabilizers using suction filtration to predict treatment effects on soft clay soils," *Soils and Foundations*, vol. 63, no. 4, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.sandf.2023.101334.
- [17] G. Thomas and K. Rangaswamy, "Dynamic soil properties of nanoparticles and bioenzyme treated soft clay," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 137, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.soildyn.2020.106324.
- [18] J. Pooni, D. Robert, C. Gunasekara, F. Giustozzi, and S. Setunge, "Mechanism of Enzyme Stabilization for Expansive Soils Using Mechanical and Microstructural Investigation," *International Journal of Geomechanics*, vol. 21, no. 10, Oct. 2021, doi: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002164.
- [19] V. Divya and M. N. Asha, "Evaluation of Sustainable Methods for Embankment Stabilization," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Oct. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/573/1/012008.
- [20] N. G. Kebede, "Effects of Brewery Spent Grain Ash on Lime-Stabilized Clayey Soil," *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2023, doi: 10.1007/s42947-023-00287-x.

- [21] A. F. Zidan, A. A. Aboukhadra, and Y. Gaber, "Enhancement of resilient modulus of cohesive soil using an enzymatic preparation," *J Cent South Univ*, vol. 26, no. 9, pp. 2596–2608, Sep. 2019, doi: 10.1007/s11771-019-4197-1.
- [22] V. Divya and M. N. Asha, "Microstructural Studies on Enzyme-Modified Lateritic Subgrade," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 356–369, Mar. 2023, doi: 10.1007/s42947-021-00136-9.
- [23] C. M. Aswathy, A. S. Raj, and M. K. Sayida, "Effect of Bio-enzyme—Chemical Stabilizer Mixture on Improving the Subgrade Properties," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021, pp. 779–787. doi: 10.1007/978-981-15-6237-2_63.
- [24] P. J. V. Oliveira, L. D. Freitas, and J. P. S. F. Carmona, "Effect of Soil Type on the Enzymatic Calcium Carbonate Precipitation Process Used for Soil Improvement," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 4, Apr. 2017, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001804.
- [25] A. S. Begum, G. V. R. Prasada Raju, D. S. V. Prasad, and M. Anjan Kumar, "Influence of TerraZyme on Compaction and Consolidation Properties of Expansive Soil," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021, pp. 525–535. doi: 10.1007/978-981-15-6237-2_44.
- [26] T. Hoang, J. Alleman, B. Cetin, K. Ikuma, and S.-G. Choi, "Downloaded from www.nrcresearchpress.com by Mount Royal University on 08/11/18. For personal use only." [Online]. Available: www.nrcresearchpress.com
- [27] M. Arabani and M. M. Shalchian, "A review of the use of bio-based substances in soil stabilization," *Environment, Development and Sustainability*. Springer Science and Business Media B.V., 2023. doi: 10.1007/s10668-023-03241-w.
- [28] J. Y. Song, Y. Sim, J. Jang, W. T. Hong, and T. S. Yun, "Near-surface soil stabilization by enzyme-induced carbonate precipitation for fugitive dust suppression," *Acta Geotech*, vol. 15, no. 7, pp. 1967–1980, Jul. 2020, doi: 10.1007/s11440-019-00881-z.
- [29] P. V. Kolhe and A. I. Dhattrak, "Unconfined compressive strength of bio-enzymatic treated expansive (BC) soil," *Mater Today Proc*, vol. 62, no. P12, pp. 6809–6813, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.946.
- [30] A. Thomas, R. K. Tripathi, and L. K. Yadu, "A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag," *Arab J Sci Eng*, vol. 43, no. 10, pp. 5193–5202, Oct. 2018, doi: 10.1007/s13369-017-3033-x.

- [31] A. Thomas, R. K. Tripathi, and L. Yadu, "Application of Taguchi Method for Optimization of Various Factors in Improving the Shear Modulus of Enzyme Treated Soil," *National Academy Science Letters*, vol. 43, no. 2, pp. 171–175, Apr. 2020, doi: 10.1007/s40009-019-00833-x.
- [32] A. G. Thomas and B. K. Rangaswamy, "Strength behavior of enzymatic cement treated clay," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 259–272, 2021, doi: 10.1080/19386362.2019.1622854.
- [33] T. A. Khan *et al.*, "Strength and volume change characteristics of clayey soils: Performance evaluation of enzymes," *Minerals*, vol. 10, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/min10010052.
- [34] A. J. Puppala, "Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice," *Transportation Geotechnics*, vol. 9, pp. 123–138, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.trgeo.2016.08.004.
- [35] M. Hoy *et al.*, "Improved fatigue properties of cement-stabilized recycled materials – Lateritic soil using natural rubber latex for sustainable pavement applications," *Transportation Geotechnics*, vol. 40, May 2023, doi: 10.1016/j.trgeo.2023.100959.
- [36] M. Al-Mukhtar, A. Lasledj, and J. F. Alcover, "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C," *Appl Clay Sci*, vol. 50, no. 2, pp. 191–198, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.clay.2010.07.023.
- [37] Ş. Eren and M. Filiz, "Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Dari{dotless}dere material," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2473–2480, Jul. 2009. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.01.002.
- [38] Y. Du, S. Li, and S. Hayashi, "Swelling-shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China," 1999.
- [39] A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz, and B. García, "Stabilization of expansive soils for use in construction," *Appl Clay Sci*, vol. 51, no. 3, pp. 348–352, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.clay.2010.12.027.
- [40] M. Al-Mukhtar, A. Lasledj, and J. F. Alcover, "Lime consumption of different clayey soils," *Appl Clay Sci*, vol. 95, pp. 133–145, 2014, doi: 10.1016/j.clay.2014.03.024.
- [41] E. Vitale, D. Deneele, G. Russo, and G. Ouvrard, "Short-term effects on physical properties of lime treated kaolin," *Appl Clay Sci*, vol. 132–133, pp. 223–231, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.clay.2016.04.025.
- [42] E. Mansour, J. Kinuthia, J. Oti, and Q. Al-Waked, "Sulfate soil stabilisation with binary blends of lime–silica fume and lime–ground granulated blast furnace slag," *Transportation Geotechnics*, vol. 37, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100888.

- [43] M. Keramatikerman, A. Chegenizadeh, and H. Nikraz, "Effect of GGBFS and lime binders on the engineering properties of clay," *Appl Clay Sci*, vol. 132–133, pp. 722–730, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.clay.2016.08.029.
- [44] A. J. Choobbasti and S. S. Kutanaei, "Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 981–988, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.jrmge.2017.03.015.
- [45] S. GhavamShirazi and H. Bilsel, "Characterization of volume change and strength behavior of micro-silica and lime-stabilized Cyprus clay," *Acta Geotech*, vol. 16, no. 3, pp. 827–840, Mar. 2021, doi: 10.1007/s11440-020-01060-1.
- [46] A. R. Goodarzi, H. R. Akbari, and M. Salimi, "Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume," *Appl Clay Sci*, vol. 132–133, pp. 675–684, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.clay.2016.08.023.
- [47] A. Seco, L. Miqueleiz, E. Prieto, S. Marcelino, B. García, and P. Urmeneta, "Sulfate soils stabilization with magnesium-based binders," *Appl Clay Sci*, vol. 135, pp. 457–464, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.clay.2016.10.033.
- [48] A. Behnood, "Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques," *Transportation Geotechnics*, vol. 17. Elsevier Ltd, pp. 14–32, Dec. 01, 2018. doi: 10.1016/j.trgeo.2018.08.002.
- [49] N. Degirmenci, A. Okucu, and A. Turabi, "Application of phosphogypsum in soil stabilization," *Build Environ*, vol. 42, no. 9, pp. 3393–3398, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.08.010.
- [50] R. M. Nidzam and J. M. Kinuthia, "Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag - a review," *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, vol. 163, no. 3, pp. 157–165, 2010. doi: 10.1680/coma.2010.163.3.157.
- [51] A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz, B. Garci, and E. Prieto, "The use of non-conventional additives in Marls stabilization," *Appl Clay Sci*, vol. 51, no. 4, pp. 419–423, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.clay.2010.12.032.
- [52] P. Gireesh Kumar *et al.*, "An Experimental Investigation on Soil Stabilization using Terrazyme," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/1006/1/012023.
- [53] V. Khanna, B. Beriha, and U. C. Sahoo, "Mechanical Characterization of a Bio-enzyme Treated Granular Lateritic Soil for Application in Low Volume Roads," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 185–193. doi: 10.1007/978-981-16-6456-4_21.

- [54] P. V. Kolhe and A. I. Dhattrak, "Unconfined compressive strength of bio-enzymatic treated expansive (BC) soil," *Mater Today Proc*, vol. 62, no. P12, pp. 6809–6813, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.946.
- [55] V. S. Chaurasia, P. P. Pandey, A. V. Mishra, S. S. Gupta, and A. U. Pawar, "Stabilization of Soil Using Terrazyme for Road Construction," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021, pp. 671–683. doi: 10.1007/978-981-33-6444-8_60.
- [56] R. Renjith, D. J. Robert, C. Gunasekara, S. Setunge, and B. O'Donnell, "Optimization of Enzyme-Based Soil Stabilization," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32, no. 5, May 2020, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003124.
- [57] H. Peng, H. Su, X. Zhang, and J. Wang, "An experimental comparison of compressive strengths of soils stabilized with enzyme and ground quicklime," in *Advanced Materials Research*, 2011, pp. 9–12. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.280.9.
- [58] "50^a CONFERENCIA GEOTÉCNICA DE LA INDIA EVALUACIÓN DE RENOLITH COMO ESTABILIZADOR DE SUBRASANTE."
- [59] V. Divya and M. N. Asha, "Performance evaluation of bio-stabilized soils in pavements," Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021, pp. 523–529. doi: 10.1007/978-981-15-5195-6_41.
- [60] S. Marathe and A. U. R. Shankar, "Investigations on Bio-enzyme Stabilized Pavement Subgrades of Lateritic, Lithomargic and Blended Soils," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 15–25, Jan. 2023, doi: 10.1007/s42947-021-00107-0.
- [61] V. Divya and M. N. Asha, "Comparative Study on Mechanical Behaviour of Enzyme Modified Soils," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 2022, doi: 10.1680/jgrim.22.00029.
- [62] D. Viswanath, S. M. Asce, M. N. Asha, and A. M. Asce, "Experimental Investigations on Bio-Modified Soil."
- [63] P. Parik and N. R. Patra, "Effect of Bio-enzyme on Strength and Microstructure of Banda Clay Soil, India," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 135–148, Jan. 2023, doi: 10.1007/s40999-022-00764-7.
- [64] S. F. Chitragar, C. B. Shivayogimath, and R. H. Mulangi, "Study on strength and volume change behavior of expansive soil using non-traditional (bio-enzyme) and traditional (lime and bagasse ash) stabilizers," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 29, Springer, 2019, pp. 587–594. doi: 10.1007/978-981-13-6713-7_46.

- [65] R. Pradhan, T. Shil, S. Nanda, and B. G. Mohapatra, "Reduction of Sub Base Layer Using Bio-enzyme Treated Soil," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 789–797. doi: 10.1007/978-981-16-7509-6_61.
- [66] N. Kumar, A. Sharma, and K. Singh, "Influence of Pond Ash on Compaction and Strength of Clayey Soil Mixed with Terrazyme," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 973–980. doi: 10.1007/978-981-16-6557-8_78.
- [67] G. Thomas and K. Rangaswamy, "Dynamic soil properties of nanoparticles and bioenzyme treated soft clay," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 137, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.soildyn.2020.106324.
- [68] V. Divya and M. N. Asha, "Determination of Resilient Modulus of Layered Bio-stabilized Soil," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 581–588. doi: 10.1007/978-981-16-4396-5_50.
- [69] A. Tiwari, J. K. Sharma, and V. Garg, "Stabilization of Expansive Soil Using Terrazyme," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021, pp. 113–125. doi: 10.1007/978-981-33-6444-8_10.
- [70] S. Singh, "Experimental investigation on black cotton soil altered thru cement kiln dust and terrazyme," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 3661–3664. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.147.
- [71] E. Jacob Joseph and M. Sayida, *Estabilización bioenzimática de arcilla caolinítica 13*. 2019.
- [72] Nehaun, K. Prasanna, N. O. Prajapathi, M. R. Ashraf, and V. M. V. S. Krishna, "Analysing the Effect of Enzyme-Induced Stabilization (EIS) in Improving the Strength Characteristics of Weak Soils," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 241–251. doi: 10.1007/978-981-16-5839-6_22.
- [73] D. Viswanath and M. N. Asha, "Bio-Modification—An Emerging Ground Improvement Technique," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 923–929. doi: 10.1007/978-981-16-1342-5_73.