



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EROSIVOS HACIENDO USO DE MATERIALES
ECO-AMIGABLES**



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

NATALIA PAOLA CONTRERAS GUZMAN

NATALIA MOUTHON BARRAZA

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA

2022



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EROSIVOS HACIENDO USO DE MATERIALES
ECO-AMIGABLES.**

AUTORES:

NATALIA PAOLA CONTRERAS GUZMAN

NATALIA MOUTHON BARRAZA

MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIEROS CIVILES

DIRECTOR:

JAIR DE JESÚS ARRIETA BALDOVINO

GRUPO DE INVESTIGACIÓN:

GEOMAVIT

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

GEOTECNIA

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D.T.Y C.

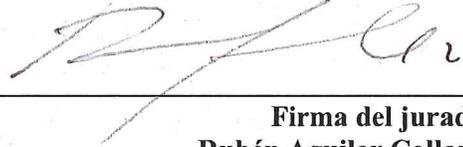
2022



NOTA DE ACEPTACION

Felicitaciones por el
trabajo. Exitos!


Firma del director
Jair Arrieta Baldovino


Firma del jurado
Rubén Aguilar Collazo

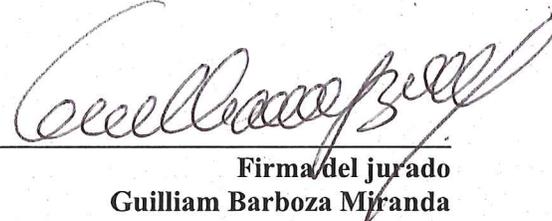

Firma del jurado
Guilliam Barboza Miranda



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCION.....	9
OBJETIVO GENERAL	¡Error! Marcador no definido.
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	¡Error! Marcador no definido.
DISEÑO METODOLOGICO	11
1. DEFINICIÓN DE SUELO.....	13
1.1. CAPACIDAD Y USO DEL SUELO.....	13
1.2. CALIDAD DEL SUELO.....	14
2. DEFINICIÓN Y CUANTIFICACION DE LA EROSIÓN	15
2.1. DEFINICION DE EROSIÓN	15
2.1.1. EROSIÓN EÓLICA	16
2.1.2. EROSIÓN HÍDRICA	16
2.1.3. EROSIÓN MECÁNICA	17
2.2. CUANTIFICACIÓN DE LA EROSIÓN	18
2.2.1. ENSAYOS DE EROSIÓN IN SITU	18
2.2.2. ENSAYOS DE EROSIÓN EN EL LABORATORIO	22
3. TÉCNICAS TRADICIONALES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN	24
3.1. MÉTODOS MECÁNICOS.....	24
3.2. MÉTODOS FÍSICOS	24
3.3. MÉTODOS QUÍMICOS	24
3.3.1. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND	25
3.3.2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL	25
4. TÉCNICAS ECOAMIGABLES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN	26
4.1. BIBLIOMETRIA.....	26
4.2. COMPILACION DE ARTÍCULOS TÉCNICAS ECOAMIGABLES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN.....	32
5. CONCLUSIONES	46
6. BIBLIOGRAFIA.....	49



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Conjunto mínimo de datos de indicadores para la evaluación de la calidad del suelo.....	14
Tabla 3. Ensayos de cuantificación de la erosión IN SITU.....	18
Tabla 4. Ensayos de cuantificación de la erosión en el laboratorio.....	22
Tabla 5. String de búsquedas en la base de datos scopus	26
Tabla 6. Compilación de las técnicas ecoamigables y sus principales resultados.....	33
Tabla 7. Tabla resumen de los diferentes tipos de estabilizante encontrados en los artículos, frecuencia de aparición y porcentaje	43



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diseño metodológico monografía.....	11
Figura 2. Erosión eólica.....	16
Figura 3. Erosión hídrica.....	17
Figura 4. Documentos vs año de publicación en los últimos 7 años.....	28
Figura 5. Documentos y países de publicación en los últimos 7 años.....	29
Figura 6. Área de estudio de interés de los documentos en los últimos 7 años.....	30
Figura 7. Documentos vs autor en los últimos 7 años.....	30
Figura 8. Red bibliométrica.....	31
Figura 9. (a) El mecanismo de arena-biopolímero-matriz raíz: (b) Transformación de tensiones en el plano de falla y (c) interacción raíz-partícula de arena-biopolímero.....	44
Figura 10. Diagramas esquemático del mecanismo de mejora de las propiedades físico-mecánicas del suelo mediante el tratamiento MICP.....	44
Figura 11. Esquema de estabilización geopolimérica.....	45



RESUMEN

La erosión además de ser una de las consecuencias del cambio climático que pone en mayor riesgo el recurso suelo, las intervenciones humanas (es decir, la minería, los proyectos de construcción de infraestructura y la labranza) también desencadenan la erosión del suelo debido a la alteración de las características generales de la cubierta vegetal y los accidentes geográficos. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se realizó una investigación y compilación de artículos y trabajos científicos con el objetivo de explorar las diferentes técnicas de estabilización y control de suelos erosivos que se están investigando a nivel mundial, especialmente de aquellas que no generen un mayor daño ambiental. Para esto se realizó un bibliometría para seleccionar los artículos más afines, haciendo uso de la base de datos Scopus, la cual arrojó más de cuatrocientos artículos de los cuales se seleccionaron quince para realizar esta revisión bibliográfica; uno de los métodos más estudiados es el uso de los biopolímeros, este método resultó ser eficaz de forma general en todas las muestras tratadas, ya que estas exhibieron una mayor resistencia superficial en comparación con las muestras a las que no se les aplicó biopolímeros. Otro de los métodos más estudiados en los artículos escogidos es la precipitación de carbonato de calcio inducida por microbios (MICP), al usar este tratamiento en el suelo se forman estructuras que contribuyen principalmente a mejorar la resistencia a la erosión, además, las emisiones de carbono de este método son mucho menores en comparación con métodos tradicionales como la estabilización con cemento, también se encontró que el proceso de MICP no tiene toxicidad, por lo que casi no tiene efectos negativos en el medio ambiente. Se encontró de forma general que los métodos eco-amigables son altamente efectivos para la estabilización de suelos erosivos, sin embargo, en Colombia no se evidenciaron estudios de estas técnicas, por esta razón resulta indispensable continuar con la investigación e incentivar su estudio a nivel local.

Palabras claves: erosión eólica, suelos, erosión del suelo, erosión, arena, corteza del suelo.



ABSTRACT

Erosion, in addition to being one of the consequences of climate change that puts the soil resource at greater risk, human interventions (i.e., mining, infrastructure construction projects and tillage) also trigger soil erosion. alteration of the general characteristics of the vegetation cover and geographical accidents. Considering the above, an investigation and compilation of articles and scientific papers was carried out with the aim of exploring the different techniques of stabilization and control of erosive soils that are being investigated worldwide, especially those that do not generate greater environmental damage. For this, a bibliometric was carried out to select the most related articles, making use of the Scopus database, which yielded more than four hundred articles of which fifteen were selected to carry out this bibliographic review; one of the most studied methods is the use of biopolymers, this method turned out to be generally effective in all the treated samples, since they exhibited greater surface resistance compared to the samples to which biopolymers were not applied. Another of the most studied methods in the selected articles is the microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP), when using this treatment in the soil, structures are formed that mainly contribute to improving resistance to erosion, in addition, the emissions of carbon from this method are much lower compared to traditional methods such as cement stabilization, it was also found that the MICP process has no toxicity, so it has almost no negative effects on the environment. In general, it was found that eco-friendly methods are highly effective for the stabilization of erosive soils, however, in Colombia there were no studies of these techniques, for this reason it is essential to continue with the research and encourage its study at the local level.

Keywords: wind erosion, soils, soil erosion, erosion, sand, soil crust.



INTRODUCCION

El estudio del suelo ha sido una pieza fundamental en el progreso de la humanidad a lo extenso de la historia, ya que conocer sus características siempre ha determinado las ocupaciones y el uso que se le da a este valioso recurso. Se puede decir, que el suelo condiciona notablemente las actividades de carácter social y económico de los individuos que se localicen en esa zona (Burbano-Orjuela, 2016).

Al conocer las cualidades del suelo se establecen las necesidades y las falencias que este puede presentar. La erosión de la superficie del suelo es un fenómeno natural común que conduce considerablemente a la degeneración de la tierra y al deterioro del medio ambiente (Liu et al., 2021). La erosión siempre ha sido un tema de interés, debido a que esta causa una pérdida de la capa superior de los suelos por la acción del hombre, del agua y/o aire. Este fenómeno ha afectado a diferentes locaciones a nivel mundial ya que, ciertas características propias del suelo pueden hacer que este sea más proclive a la erosión y en consecuencia a esto se ven afectados los ecosistemas, las comunidades, y la estabilidad del suelo especialmente en las zonas donde se ha eliminado o deteriorado por completo la cubierta vegetal (Hincapié Gómez et al., 2013).

La degradación del suelo ocasionada por el hombre como consecuencia del mal uso del territorio origina el deterioro de grandes superficies de tierra (Vega – Carreño, 2005). Las diferentes actividades entre estas, la deforestación, urbanización o explotación minera generan un impacto negativo en los ecosistemas, por lo que se deben ejecutar acciones preventivas para ayudar a la preservación de estos recursos naturales (Ramírez Celis, F. G., 2019).

De acuerdo con lo anterior, nace la necesidad de encontrar métodos para preservar este recurso natural no renovable. Por tanto, la presente revisión bibliográfica se presenta con el objetivo de compilar las diferentes técnicas tradicionales y actuales, especialmente aquellas soluciones que sean amigables con el ambiente para mitigar la erosión del suelo en ambientes susceptibles. Además, se determinaron los materiales que se están usando hoy en día para controlar la erosión superficial, debido a que generalmente, las soluciones tradicionales



empleadas a la problemática de la erosión se realizan por medio de obras mecánicas de concretos particulares de la ingeniería civil que suelen tener un costo elevado.

La monografía se desarrolló bajo la línea de investigación de geotecnia ya que esta se encuentra enfocada en la composición y propiedades de los suelos, además de como estos responden a distintos factores que pueden incidir en el desarrollo de la erosión. Para su elaboración se tuvieron como fuentes principales artículos científicos, tesis de grado, estudios geológicos, y demás fuentes relacionadas con la erosión de suelos que se están desarrollando a nivel mundial. Teniendo en cuenta lo anterior se obtuvo un banco de información sólido que busca beneficiar a la comunidad académica, geotécnica y autoridades ambientales brindando información robusta, confiable y actualizada de las diferentes técnicas de mitigación de la erosión, con el fin de dar cuentas de los avances y tendencias de desarrollo que se están implementando a nivel de ingeniería para brindar futuras soluciones a la problemática de erosión de suelos, no solo haciendo uso de las técnicas tradicionales sino especialmente aquellas que generen menos estrés a los ecosistemas.

La valoración bibliográfica se realizó en la ciudad de Cartagena de Indias, Colombia. Sitio donde se encuentra establecida la universidad Cartagena cuyo programa de ingeniería civil es el encargado de la presente monografía, además de ser el lugar donde viven los autores y director del proyecto de grado.



DISEÑO METODOLOGICO

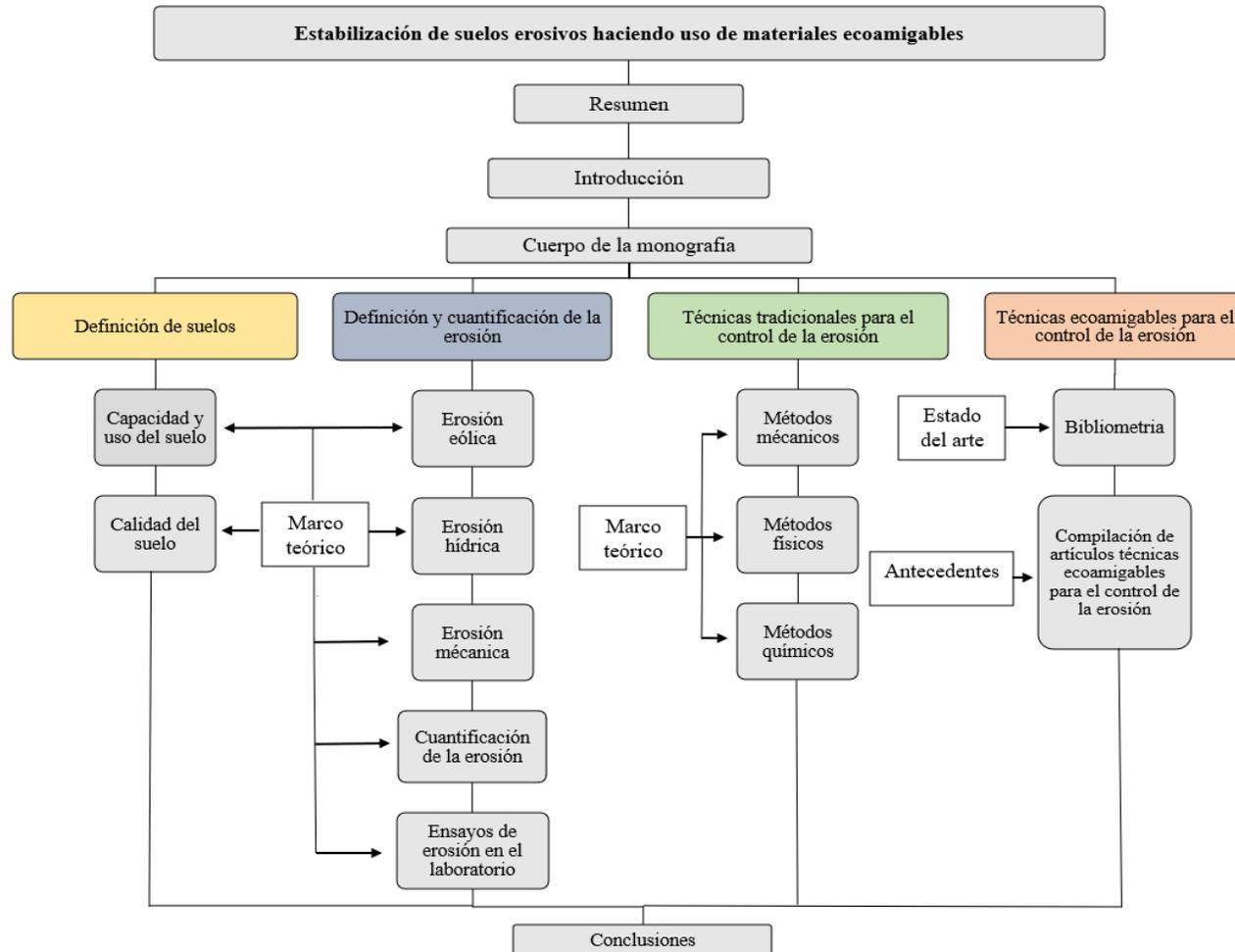


Figura 1. Diseño metodológico monografía. Fuente: Autores.



En la Figura 1. Diseño metodológico monografía. **Fuente:** Autores. se presenta el diseño metodológico de la presente monografía; en el primer y segundo capítulo se presenta la definición de suelos y la definición y cuantificación de la erosión, estas bases teóricas son necesarias para el análisis adecuado de esta monografía; en el tercer capítulo se presenta las técnicas tradicionales para el control de la erosión, finalmente en el cuarto capítulo se presenta las técnicas eco-amigables para el control de la erosión, en el cual se realiza la compilación y resumen de los hallazgos más relevantes.



1. DEFINICIÓN DE SUELO

Históricamente el suelo ha sido relacionado con la agricultura, lo que admitió cambios significativos en la elaboración de alimentos, además fue considerado con capacidad desmedida para asimilar contaminantes sin causar efectos perjudiciales inmediatos sobre el ambiente (Trujillo-González et al., 2018). En la actualidad, se puede decir que el suelo es el componente básico del medio ambiente, este se considera natural y finito, este contiene minerales, aire, agua, materia orgánica, macroorganismos, encargándose de realizar los procesos bióticos y abióticos regulares y ejecutando funciones que aseguran la supervivencia del ecosistema (IDEAM, 2015).

1.1. CAPACIDAD Y USO DEL SUELO

Las comunidades deben velar que la tierra no se degrade y que esta se utilice de acuerdo con su capacidad para subsanar las necesidades presentes y futuras. El uso inapropiado de la tierra conduce no solo a un desarrollo ineficiente y degradado de los recursos naturales, sino también a la pobreza y otros inconvenientes sociales (Rossiter, 1996).

El uso del suelo se establece de acuerdo con sus propiedades físicas. La condición física del suelo determina la dureza, la capacidad de carga, la aireación, el drenaje, la plasticidad y la capacidad de retención de agua y de nutrientes (Rucks, 2004). Se considera que la función del suelo es la capacidad que tiene este para ser significativo para la agricultura, el medio ambiente, la defensa de la naturaleza y el diseño del paisaje, actualmente existe una clara competitividad por el recurso suelo, donde su principal uso está orientado en la obtención de energía, alimentación humana y manutención animal (Trujillo-González et al., 2018).



1.2. CALIDAD DEL SUELO

A pesar de las crecientes preocupaciones sobre la degradación de la tierra, la degradación de la calidad del suelo y su impacto en el confort humano y el entorno, todavía no existe un estándar universal para determinar los cambios en la calidad del suelo (Arshad, 1992). Para que este concepto sea aplicable, se deben utilizar variables que consigan evaluar las condiciones del suelo. Estas variables se denominan indicadores porque representan un estado y contienen información sobre cambios o tendencias, en la Tabla 1. Conjunto mínimo de datos de indicadores para la evaluación de la calidad del suelo. **Fuente:** elaboración propia; información: se presentan el conjunto mínimo de datos que se utilizan para evaluar la calidad del suelo.

Tabla 1. Conjunto mínimo de datos de indicadores para la evaluación de la calidad del suelo. **Fuente:** elaboración propia; información: (Seibold, 1999)

Indicador de la condición del suelo		Relación con la calidad del suelo
Físico	Estructura del suelo	Retención y transporte de agua y productos químicos, uso de modelos y degradación del suelo
	Profundidad del suelo, capa superficial del suelo y enraizamiento	Estimación del potencial de productividad y erosión, normaliza el Paisaje y la variabilidad geográfica
	Infiltración y densidad aparente	Potencial de lixiviación, productividad y erosividad
	Capacidad de retención de agua	Relacionados con la retención de agua, el transporte, erosividad, agua disponible.
Químico	Materia orgánica del suelo	Fertilidad del suelo, estructura, estabilidad, retención de



		nutrientes, erosión del suelo y capacidad de agua disponible.
	pH	Actividad biológica y disponibilidad de nutrientes
	Conductividad eléctrica	Crecimiento vegetal, actividad microbiana y tolerancia a la sal
Biológico	Biomasa microbiana	Potencial catalítico microbiano y depósito de C y N
	Respiración del suelo, contenido de agua y temperatura.	Actividad microbiana

2. DEFINICIÓN Y CUANTIFICACION DE LA EROSIÓN

2.1. DEFINICION DE EROSIÓN

La erosión es la separación, transporte y deposición de granos o pequeños trozos de suelo o roca por la fuerza del agua en movimiento o debido a fuerzas generadas por el aire (Suárez, J, 1998). La palabra erosión deriva del latín "erodere" lo cual significa rebajamiento o disminución (Carlos & Hidalgo, 1998). Además de esto la erosión también ha sido descrito como un fenómeno natural que forma parte de la dinámica de la superficie terrestre; los ciclos de erosión son la principal herramienta de modelado, actuando de forma permanente en casi toda la superficie continental y en todas las épocas geológicas.

Uno de los agentes más importantes que actúa en la erosión es la precipitación, considerándose esta como el principal origen de agua sobre el terreno; la intensidad de la lluvia es uno de los factores más importantes, debido a que la velocidad de penetración del agua en la superficie es a menudo escasa, cuando esta cae con gran intensidad llega al suelo una gran cantidad de agua en poco tiempo, lo que provoca rápidamente escorrentía (Ramírez Celis, F. G., 2019). Generalmente, puede decirse que cuando la tasa de infiltración sea mayor que la intensidad de la precipitación, no se producirá escurrimiento que derive en



erosión y se observará una lluvia erosiva moderada cuando el suelo ya esté saturado (León Peláez, J, 2001).

2.1.1. EROSIÓN EÓLICA

La erosión eólica generalmente está asociada con las tempestades de polvo. Esta erosión causa daños temporales que afectan al hombre, los animales y la vegetación. Al arrancar el viento este transporta arcilla, limo y materia orgánica, dejando grandes fracciones del suelo; esto hace que quede más arenoso y por ende más susceptible a la erosión, además de que se han eliminado los materiales básicos teniendo en cuenta la productividad y la retención de agua (Puertas, J. Q., 1987), en la figura 2, se muestra cómo se presenta la erosión eólica:



Figura 2. Erosión eólica. **Fuente:** Ropero, S. (2020) erosión eólica. Ecología verde. <https://acortar.link/uBRBYR>

2.1.2. EROSIÓN HÍDRICA

La erosión hídrica se refiere al proceso que causa la separación, transporte y almacenamiento de los fragmentos de suelo por la operación de diferentes agentes, como la energía cinética



de la gota de lluvia, esta se disipa por encima de la superficie provocando el rompimiento de las masas y agregados, ocasionando una salpicadura que desprende partículas que posteriormente son conducidas pendiente abajo. Otro agente involucrado es la escorrentía en movimiento, que se refiere a la liberación de suelo nuevo y el transporte del suelo removido, cuya dimensión es proporcional al caudal escurrido y a la velocidad que alcanza el flujo de agua. El último agente es la gravedad debido a su capacidad para mover el suelo, especialmente en pendientes altas y húmedas (Cisneros, J. M., & Cholaky, C., 2012).

Dentro de los tipos de erosión hídrica se encuentra la erosión por salpicadura, erosión laminar, erosión por surcos, erosión en cárcavas, erosión por movimientos en masa y erosión de cursos permanentes en la Figura 3, se muestra una forma en la que se puede representar la erosión hídrica.



Figura 3. Erosión hídrica. **Fuente:** Novilla, C. (2019) Erosión hídrica. Ecología verde. <https://acortar.link/3fTewr>

2.1.3. EROSIÓN MECÁNICA

La erosión mecánica es un proceso en el que la redistribución del suelo por arrastre mecánico en el transcurso de las operaciones agrícolas ocasiona cambios en el paisaje y degradación



de los suelos a largo plazo. El efecto acumulativo de la redistribución de la tierra debido a prácticas agrícolas pasadas ha resultado en cambios dramáticos en la morfología de las pendientes y la topografía de las tierras cultivadas, así como en la variabilidad espacial de las propiedades del suelo (Alba, S. D., et al., 2011).

2.2. CUANTIFICACIÓN DE LA EROSIÓN

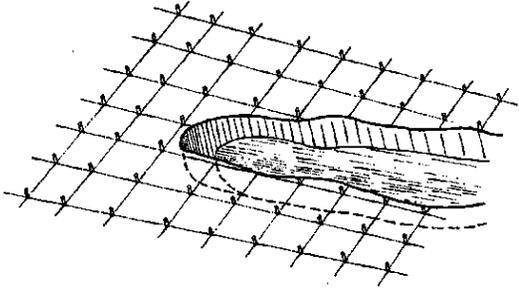
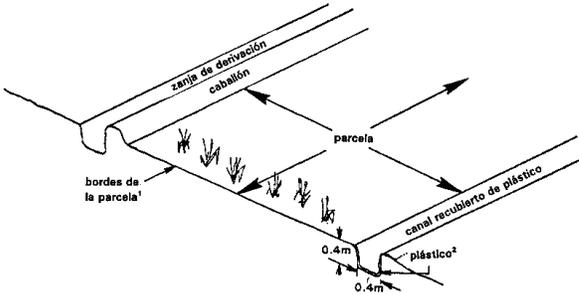
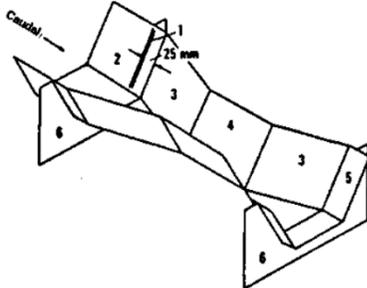
2.2.1. ENSAYOS DE EROSIÓN IN SITU

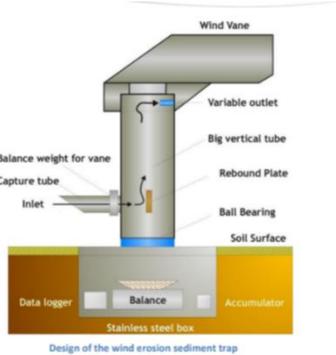
Existen varios métodos para determinar la erosión del suelo, muchos de los cuales son muy simples y económicos; estas técnicas son de gran ayuda para estimar de manera inicial la cantidad de suelo erosionado y ver cómo varía una superficie en un tiempo determinado; en la Tabla 2. *Ensayos de cuantificación de la erosión IN SITU*. **Fuente:** elaboración propia; *información:* Cerdà, A.,2001. con se presentan algunas de las técnicas más utilizadas:

Tabla 2. *Ensayos de cuantificación de la erosión IN SITU*. **Fuente:** elaboración propia; *información:* Cerdà, A.,2001.

TÉCNICA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Estacas o agujas de erosión	Se posicionan estacas en el suelo y se mide la disminución de la superficie a intervalos regulares de tiempo o después de cada lluvia. Se recomienda esta técnica en las zonas donde la tasa de erosión es grande y también para mediciones durante largos periodos de tiempo.	



<p>Marcas superficiales</p>	<p>Este es similar a la técnica de las estacas de erosión, la diferencia radica que las estacas no se anclan a la roca madre. Este método se utiliza sobre todo en suelos donde el principal agente de transporte es la erosión por salpicadura.</p>	
<p>Levantamientos topográficos</p>	<p>Los levantamientos topográficos suministran información de las variaciones en las tasas de erosión. Consiste en la toma de mediciones regulares que permitan un levantamiento del perfil transversal. Ayuda a detectar las alteraciones en la topografía.</p>	
<p>Parcelas</p>	<p>Consisten en demarcar lugares específicos del terreno y medir la escorrentía y de los sedimentos exportados que permitan estimar las tasas de erosión.</p>	
<p>Aforadores</p>	<p>Los aforadores se encargan de medir el caudal y la escorrentía, con el fin de estar al tanto de la pérdida de suelo y de la concentración de sedimentos.</p>	

<p>Medición de la salpicadura</p>	<p>Se posicionan pequeños recipientes incrustados en la superficie, mediante marcas o trazadores.</p>	
<p>Trampas</p>	<p>La medición de la erosión eólica se calcula por medio de trampas posicionadas a diferentes alturas en las que se quedan atrapados los sedimentos presentes en el aire.</p>	

A veces resulta necesario estimar las tasas de pérdida de suelo a partir de modelos. El modelo Universal Soil Loss Equation (USLE) es una guía empírica diseñada para predecir las tasas de erosión en un solo espacio geográfico mediante la cuantificación de los factores más importantes (Cerdà, A., 2001). La ecuación y sus variables son las siguientes:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

A = es la pérdida de suelo por unidad de superficie. Sus dimensiones son $Mg.ha^{-1}$.

R = es el factor erosividad de la lluvia. Es el producto acumulado para el período de interés (en planificación agropecuaria generalmente un año) con cierta probabilidad de ocurrencia (normalmente 50% o promedio), de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos de las lluvias. Sus dimensiones son $MJ.mm.ha^{-1}.hr^{-1}.año^{-1}$.



K = es el factor de erodabilidad del suelo. Es la cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor R ($Mg.J^{-1}$), cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de la pendiente (condiciones de máxima erosión posible).

Los demás factores son relaciones a estándares y no tienen dimensiones:

L = es el factor longitud de la pendiente. Es la relación entre la erosión con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 22,1 m de longitud, a igualdad de los demás factores.

S = es el factor inclinación de la pendiente. Es la relación entre la erosión con una inclinación de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 9% de inclinación, a igualdad de los demás factores.

C = es el factor uso y manejo. Es la relación entre la erosión de un suelo con un determinado sistema de uso y manejo y la que ocurre en el mismo suelo puesto en las condiciones estándar en que se definió el factor K, a igualdad de los demás factores.

P = es el factor de práctica mecánica de apoyo. Es la relación entre la erosión que ocurre con una determinada práctica mecánica de apoyo y la que ocurre con la condición estándar de laboreo a favor de la pendiente, a igualdad de los demás factores.



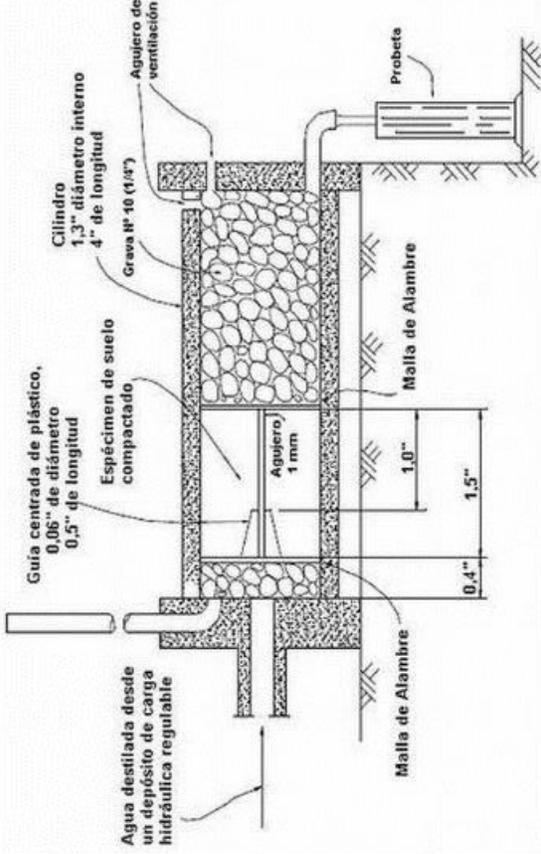
2.2.2. ENSAYOS DE EROSIÓN EN EL LABORATORIO

Existen varios métodos para medir la erosión del suelo, en el laboratorio; estas técnicas son de gran ayuda para estimar de manera más profunda la cantidad de suelo erosionado en la Tabla 3. *Ensayos de cuantificación de la erosión en el laboratorio. Fuente: elaboración propia; información: Suárez, J. (2001).* se presentan algunas de las técnicas más utilizadas:

Tabla 3. *Ensayos de cuantificación de la erosión en el laboratorio. Fuente: elaboración propia; información: Suárez, J. (2001).*

TÉCNICA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Ensayo de caída simple de agua	Se vierte agua sobre una muestra de suelo, luego el agua y los productos de erosión se depositan en un recipiente. Finalmente se realiza un análisis cuantitativo que se basa en la lodosidad.	



<p>Ensayo de desmoronamiento (Crumb test)</p>	<p>Se toma una muestra de suelo y se vierte agua, se observa si aparece una nube de partículas coloidales en torno a la muestra. Si se presenta esta nube significa que el suelo es dispersivo. Cabe resaltar que con este método no se obtienen resultados confiables si el suelo que predomina es arcilla Kaolinita.</p>	
<p>Ensayo de Pinhole</p>	<p>Se compactan las muestras de suelo, posteriormente estas se entierran en un cono de bronce y se le realiza un orificio de un milímetro de diámetro con un alfiler. Consecutivamente se determina el peso y la humedad de la muestra antes del ensayo. Luego la muestra se erosiona con ayuda de agua destilada utilizando una cabeza hidráulica de dos pulgadas durante 10 minutos. Por último, se vuelve a pesar la muestra y se adquiere la cantidad de suelo erosionado.</p>	
<p>Ensayo de dispersión</p>	<p>Se realizan dos ensayos de hidrómetro para determinar el</p>	



<p>(Soils Conservation Service)</p>	<p>porcentaje de partículas menores de 5mm; para el primer ensayo se utiliza un dispersante en la solución y el segundo ensayo se realiza sin dispersante. La probabilidad de que haya erosión es mayor entre más grande sea la relación de partículas menores de cinco mm sin dispersante.</p>	
-------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------

3. TÉCNICAS TRADICIONALES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN

Los métodos de estabilización de suelos pueden clasificarse en: mecánicos, físicos, químicos y biológicos.

3.1. MÉTODOS MECÁNICOS

Este tipo de estabilización consiste en la compactación del suelo de forma estática o dinámica con el objetivo de aumentar la densidad, la resistencia mecánica, reducir la porosidad. Además, se puede incorporar la mezcla de distintos suelos para obtener las especificaciones adecuadas. La finalidad de este procedimiento consiste en aumentar la capacidad portante del suelo, lograr una disminución en el asentamiento de las estructuras, evitar cambios volumétricos no deseados, disminuir la filtración del agua, y aumentar la estabilidad de los taludes (Das, B. M., & Sivakugan, N., 2016).

3.2. MÉTODOS FÍSICOS

Este método consiste en intervenir algunas de las características del suelo con el fin de brindarle nuevas peculiaridades estructurales. En los métodos físicos se hallan los geo sintéticos, como los geotextiles, que por lo general estos están hechos de poliéster o polipropileno; dentro de estos métodos se encuentran las geomallas, que son estructuras



tridimensionales, estas tienen la particularidad de ser fabricadas en polietileno de alta densidad; las geomembranas, que consisten en láminas de polímero en cloruro de polivinilo (PVC); el geo compuesto, el cual se utiliza de manera específica para estabilizar suelos en los que se requiera refuerzo y separar una base granular o un subsuelo muy fino (Liu, J. et al., 2011).

3.3. MÉTODOS QUÍMICOS

Los estabilizadores químicos se pueden utilizar en todas las clases de suelos para mejorar de forma general las características geotécnicas de este, con el fin de mejorar las propiedades fisicoquímicas originales del suelo natural, para reducir problemas y aumentar algunas de sus propiedades principales como la resistencia y durabilidad.

Esta estabilización involucra el uso de varios materiales, de los cuales el cemento y la cal son los más tradicionales; sin embargo, también han sido utilizados en la estabilización de suelos para construcción de carreteras otros productos como la sal (cloruro de sodio, cloruro de calcio) y residuos o subproductos industriales tales como, escoria de alto horno y cenizas volantes (Syed-Zuber et al., 2013).

3.3.1. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND

El cemento Portland es el adhesivo más utilizado en el mundo debido a su capacidad para estabilizar diferentes tipos de suelos, sin embargo, este resulta ser más eficiente en suelos arenosos y arcillosos con un índice de plasticidad medio a bajo. Los mecanismos por los cuales el cemento estabiliza el suelo son la hidratación, el intercambio catiónico, la floculación y aglomeración, la carbonatación y las reacciones puzolánicas. Entre ellos, la más primordial es la hidratación del cemento ya que ahí se originan compuestos de silicato de calcio hidratado que cementan las partículas del suelo (Pandey, A., & Rabbani, A., 2017).

3.3.2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL

La cal es utilizada generalmente como un estabilizador de suelos, su uso se remonta desde los años de 1924; la cual se utilizó ampliamente como estabilizador químico de suelos en la construcción de carreteras (Bell, F, 1996). Cuando se aplica cal al suelo el intercambio de



caciones es uno de los mecanismos que cambia las propiedades del suelo. Por la floculación de sus partículas, se incrementa la fijación de cationes Ca^{++} en la estructura del suelo, dando como resultado una reacción puzolánica, que es la responsable de la estabilidad del suelo y el cambio de sus propiedades originarias (Behnood, A., 2018).

4. TÉCNICAS ECOAMIGABLES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN

Este capítulo se desarrolló con el objetivo de dar cuenta de los avances y tendencias que se están implementando a nivel de ingeniería, en cuanto a la erosión y estabilización de suelos, teniendo en cuenta aquellas que generan menos estrés a los ecosistemas; Por lo tanto, es de gran importancia presentar las soluciones eco-amigables que se están usando a nivel mundial. Los materiales eco-amigables, se definen como aquellos cuyo uso tiene poco o ningún impacto adverso sobre el medio ambiente, además, se consideran también aquellos que no agotan los recursos naturales no renovables, ya que esto además de ayudar a la conservación del medio ambiente puede resultar en un mejoramiento integral en las características del suelo intervenido.

La búsqueda de alternativas amigables con el ambiente es crucial debido a que los aglutinantes tradicionales como el cemento y la cal han sido una fuente de graves problemas ambientales que van desde el impacto negativo en la agricultura hasta el cambio del PH del suelo y las aguas subterráneas (Emeka, A. E. et al., 2018). Otro factor importante es la reducción de los costos de construcción mediante el uso de materiales cuyos elementos principales pueden ser reciclados.



4.1. BIBLIOMETRIA

Para la realización de la bibliometría inicialmente se hizo uso de la base de datos Scopus en la cual se ingresaron diferentes string de búsqueda relacionados con el tema a desarrollar, a continuación, se presentan los string de búsqueda ingresados:

Tabla 4. String de búsquedas en la base de datos Scopus. **Fuente:** elaboración propia.

“Erosion soil”	590
“Erosive soil”	54
("erosion" AND "soil")	59312
((“erosion” AND “soil”) AND (“clay” OR “silt” OR “sand”))	8496
((“erosion” AND “soil”) AND (“clay” OR “silt” OR “sand”) AND (“degradation”))	849
((“erosion” AND “soil”) AND (“clay” OR “silt” OR “sand”) AND (“stabilization”))	466
((“erodible” AND “soil”) AND (“clay” OR “silt” OR “sand”) AND (“stabilization”))	22
((“erodible” AND “soil”) OR (“dispersive”AND “soil”)) AND ((“clay”OR“silt”OR”sand”) and (stabilization))	160
((“erodible” AND “soil”) OR (“dispersive”AND “soil”)) AND ((“clay”OR“silt”OR”sand”) and (stabilization))OR ((sustainability))	22

Después de analizar los diferentes string de acuerdo con el caso de estudio se escogió el string 5 ((“erosion” AND “soil”) AND (“clay” OR “silt” OR “sand”) AND (“stabilization”)) Debido a que este presenta las palabras más apropiadas para nuestro tema, así como también una cantidad de artículos adecuada.



Posteriormente elegido el String de búsqueda con la ayuda del Scopus se analizaron los 466 documentos en los últimos 7 años de acuerdo con el año de publicación, territorio, área de estudio y autor.

A continuación, En la Figura 4. Documentos vs año de publicación en los últimos 7 años.

Fuente: Scopus se presenta la relación de los documentos vs los años de publicación de estos:

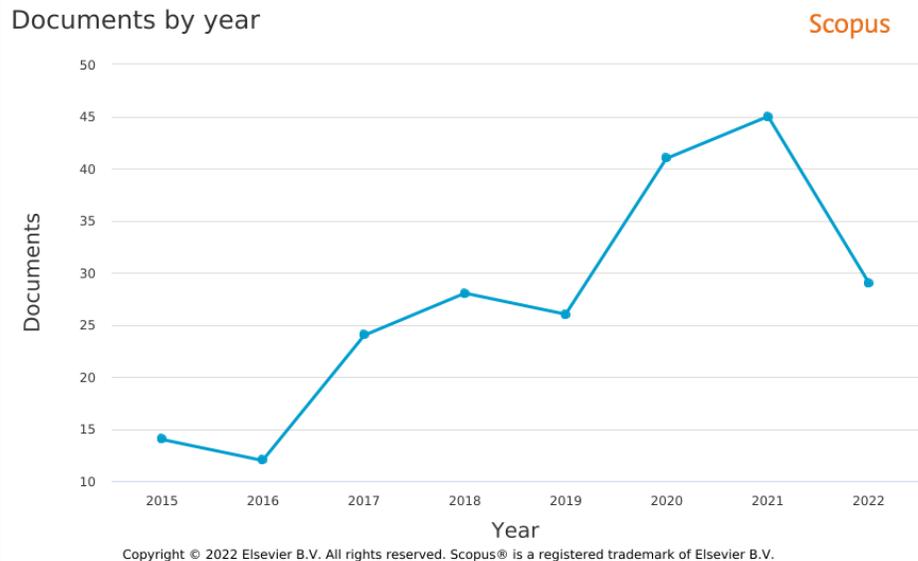


Figura 4. Documentos vs año de publicación en los últimos 7 años. **Fuente:** Scopus

se puede observar que la menor cantidad de documentos publicados fue en los años 2015 y 2016, mientras que en el año 2017 se publicaron casi el doble de documentos manteniendo casi el mismo rango para los años 2018 y 2019, además de esto se nota que la mayoría de los documentos fueron publicados en el año 2020 con más de 40 y en el año 2021 con un total de 45, por otro lado, para el año 2022 se llevan casi 30 artículos publicados. Cabe destacar que en los últimos 2 años y medio ha sido un tema de intereses de estudio bastante amplio.

Posteriormente, en la Figura 5. Documentos y países de publicación en los últimos 7 años.

Fuente: Scopus se presenta los países donde han sido publicados los documentos arrojados:

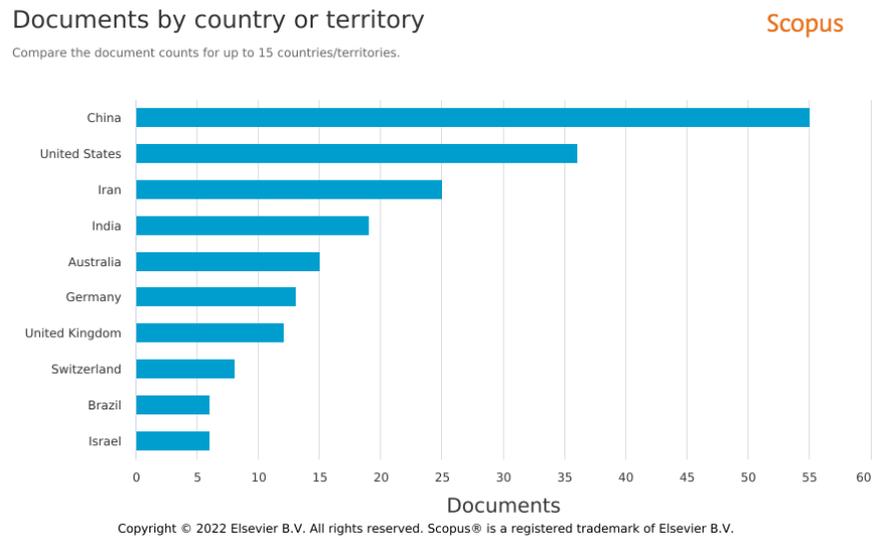


Figura 5. Documentos y países de publicación en los últimos 7 años. **Fuente:** Scopus

Se observa en la figura anterior se observa que China y Estados Unidos son los países con mayores publicaciones con un total de 55 y más de 30 documentos respectivamente, mientras que Brasil e Israel no tienen más de 10 documentos publicados. También cabe resaltar que en Colombia no se encontraron publicaciones relacionadas con el tema.

A continuación, En la Figura 6. Área de estudio de interés de los documentos en los últimos 7 años. **Fuente:** Scopus se presentan los documentos de acuerdo con el área de estudio de intereses:



Documents by subject area

Scopus

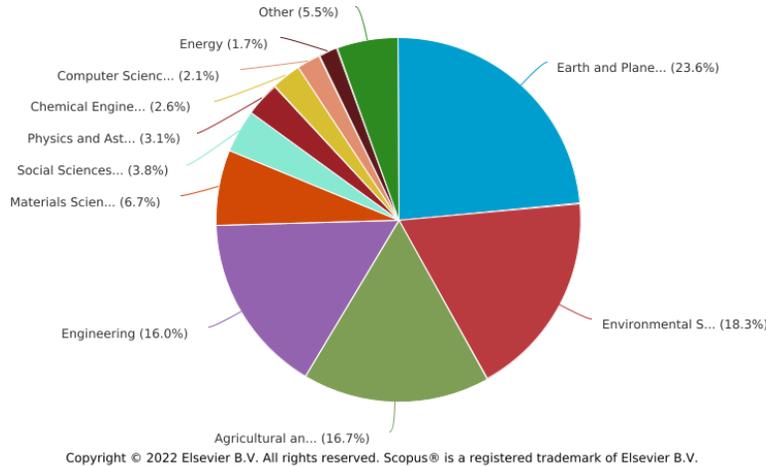


Figura 6. Área de estudio de interés de los documentos en los últimos 7 años. **Fuente:** Scopus

En la figura anterior se observa que la mayoría de los documentos están relacionados con el área de tierra y aire con un total de 23,6%, seguidamente el área ambiental con un total de 18,3%, agricultura con 16,7% e ingeniería con 16%.

Seguidamente se muestran los documentos por autor publicados en la Figura 7. Documentos vs autor en los últimos 7 años. **Fuente:** Scopus.

Documents by author

Scopus

Compare the document counts for up to 15 authors.

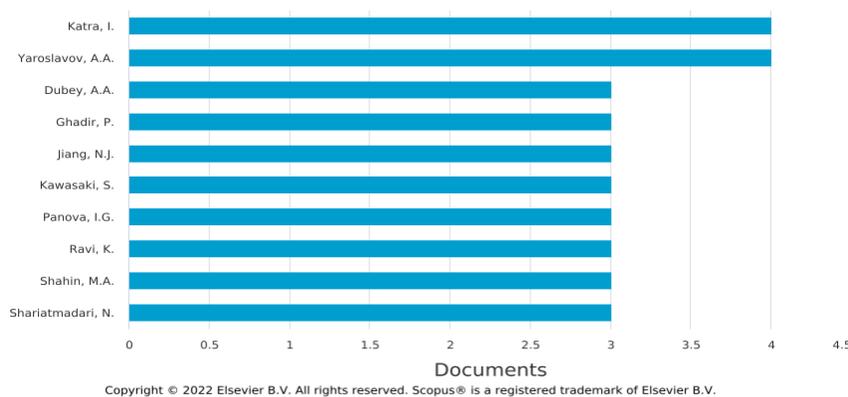


Figura 7. Documentos vs autor en los últimos 7 años. **Fuente:** Scopus.



palabras siendo soils (suelos) la palabra con más ocurrencia, para el cluster 3 se obtuvo un total de 59 palabras siendo soil erosion (erosión del suelo) la palabra más incidente, para el cluster 4 se obtuvieron 39 palabras siendo la más ocurrente erosión (erosión), para el cluster 5 se obtuvo un total 37 palabras siendo sand (arena) la palabra más incidente , y finalmente para el cluster 6 se obtuvieron 18 palabras siendo la más ocurrente soil crust (corteza del suelo).

4.2. COMPILACION DE ARTÍCULOS TÉCNICAS ECOAMIGABLES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN

Para la revisión bibliográfica se seleccionaron quince artículos científicos usando la base de datos Scopus los cuales se escogieron en base a la bibliometría realizada en el capítulo anterior. Luego se realizó una investigación exhaustiva, y se optó por aquellos cuyas palabras claves tuvieran relación al tema estudiado, además se consideró que los artículos elegidos proporcionarían una descripción completa de los métodos utilizados, resultados específicos y conclusiones sólidas. Para sintetizar la información de los artículos seleccionados se compiló en la Tabla 5. *Compilación de las técnicas eco-amigables y sus principales resultados. Fuente: elaboración propia.* los principales resultados encontrados en las investigaciones:



Tabla 5. *Compilación de las técnicas eco-amigables y sus principales resultados. Fuente: elaboración propia.*

REFERENCIA	TIPO DE SUELO	TIPO DE ESTABILIZANTE	ENSAYO	PRINCIPALES RESULTADOS
Aplicación de un recubrimiento de arena coloidal tratada con un material biopolímero de polisacárido hidrofílico para el control de la estabilidad de la capa superior del suelo, Che, W., et al, 2022	Arena	Aglutinante de biopolímero de polisacárido hidrofílico (HPB)	Compresión no confinada, prueba de corte directo, tracción directa, simulación del modelo de erosión de flujo	Los resultados indicaron que HPB podría mejorar significativamente las propiedades mecánicas de la arena natural debido a la fuerte unión entre partículas que ofrece la estructura de la membrana de red. La compresión no confinada y la resistencia a la tracción aumentaron monótonamente desde 237,54 kPa y 47,59 kPa con un contenido de HPB al 1% hasta 878,87 kPa y 141,61 kPa con un contenido de biopolímero de polisacárido hidrofílico (HPB) al 4%. Esta investigación puede ayudar en el análisis y la aplicación de tecnología modificada para controlar la falla de la capa superior del suelo.
Investigación Experimental y Evaluación del Desempeño de Arcilla Litomárgica Estabilizada con Escoria Granulada de Alto Horno y	Arcilla litomárgica	Escoria Granulada de Alto Horno (GBFS) y Cloruro de Calcio (CaCl ₂)	Resistencia a la compresión no confinada (UCS),	Al utilizar los contenidos de Escoria granulada de alto horno (GBFS) (20%) y cloruro de calcio (CaCl ₂) (6%) durante 28 días de curado se presentó un



<p>Cloruro de Calcio, Lakkimsetti, B., & Nayak, S., 2022.</p>			<p>Cohesión (c) y Angulo de fricción</p>	<p>Aumento destacado en la resistencia a la compresión no confinada en un 335,84 %, la cohesión en un 1160 % y el ángulo de fricción interna en un 32 %.</p>
<p>Efectos del recubrimiento de arena con diferentes, sustratos de suelo sobre la formación y desarrollo de biocostras artificiales en un ambiente desértico natural, Zhao, Y. et al. (2021)</p>	<p>Arena</p>	<p>Recubrimiento de arena con sustratos sobre la formación de costras biológicas artificiales del suelo (BSC), es decir, la inoculación del suelo con cianobacterias</p>	<p>Modelos de ecuaciones estructurales (SEM) para evaluar los efectos del tamaño de las partículas del suelo y el contenido de nutrientes del suelo sobre la cobertura y el espesor de las biocortezas incubadas. Los análisis SEM se realizaron utilizando el software AMOS 2.1</p>	<p>Cubrir la arena con sustratos de suelo creó hábitats de suelo más ideales porque los sustratos de suelo tienen una mayor estabilidad de la superficie de la arena, un mayor contenido inicial de materiales más finos y un mayor contenido de nutrientes, y una duración de la humedad de la superficie del suelo retrasada que los sustratos arenosos. Se alcanzó una cobertura del 15-20 % y un espesor de 2,94-4,06 mm después de 12 meses de incubación.</p>
<p>Aplicaciones de biocementación y biopolimerización para el control de la erosión eólica, Devrani, R., et al. (2021)</p>	<p>Arena</p>	<p>MICP y Goma xantana</p>	<p>Velocidad de fricción umbral (TFV), Pérdida de masa del suelo (%) y Espesor de la corteza del suelo</p>	<p>Con 0,5 m de MICP Y goma xantana con porcentajes de (0,25%- 0,5%- 1,0%) se encontró que la máxima velocidad de viento fue de 45</p>



				km/h y la pérdida de masa del suelo se redujo completamente.
Investigación experimental para mitigar la erosión eólica mediante biocementación empleada con un nuevo aislado ureolítico del suelo, Dubey, A. et al, 2021.	Arena	Cloruro de calcio	Resistencia a la compresión no confinada (UCS), velocidad umbral de desprendimiento (TDV), pérdida de la corteza de suelo y Espesor de la corteza de suelo.	Para la arena tratada de 0,5 m y 1 m la resistencia a la compresión no confinada estaba en el rango de 900 kPa. la resistencia a la erosión mejoró y la velocidad umbral de desprendimiento aumentó hasta 32 km/h con una pérdida de masa significativamente baja (19 %) en comparación con el suelo no tratado (64 %).
Estabilización Superficial de Suelos Susceptibles a la Erosión Eólica Uso de geopolímero a base de ceniza volcánica, Shariatmadari, N., et al, 2021.	Arena limpia, arena limosa y muestras de suelo limoso	Geopolímero a base de ceniza volcánica (VA) y el activador alcalino (AA)	Pruebas de resistencia a la compresión no confinada (UCS) y de túnel de viento	Los resultados de las pruebas de túnel de viento indican que todas las muestras que fueron preparados con un contenido de Activador alcalino del 15% no exhibieron ninguna erosión notable, La resistencia aumentó notablemente para las muestras curadas en condiciones secas. Además de esto también se encontró que aumentar el período de curado en



				condiciones templadas y húmedas conduce a un aumento en las variaciones de resistencia de las muestras preparadas con los activadores alcalinos al 10% y 15%.
Método biomediado para mejorar la resistencia a la erosión superficial de suelos arcillosos, Liu, B., et al, 2021.	Arcilloso	Rociado superficial con MICP (bacterias cosechadas (BS) y solución cementante (CS) agregando arena en porcentajes = 10 %, 20 %, 30 % y 40 %	pH Conductividad eléctrica (EC), Pérdida de masa del suelo y Tasa de erosión	En el estudio se encontró que el contenido de arena influye en el tratamiento MICP a través de cambios en la estructura y la permeabilidad del suelo. Además, con el aumento del contenido de arena, se mejoró la profundidad y la eficiencia del tratamiento MICP, lo que conduce a la mejora de la resistencia a la erosión del suelo.
Aplicación de precipitación de carbonato inducida por microbios para el control de la erosión superficial de loess, Cheng, Y., et al, 2021.	Arcilla de bajo límite líquido (CL).	Solución de biocemento utilizada en el proceso MICP consiste en bacterias activas de ureasa y solución de cementación (CS).	Ensayo de erosión por lluvia, Prueba de penetración, Prueba de espesor de corteza dura	Los resultados de las pruebas del modelo de pendiente muestran que el tratamiento con MICP por esterilización tiene la capacidad de mitigar la erosión por lluvia, pero se ve afectado por los ciclos de tratamiento con MICP y la concentración de la solución de cementación.



				Se encuentra que el loess tratado con solución de cementación 1,0 M podría tener la mejor resistencia a la erosión, seguido por el loess tratado con solución de cementación 1,5 M, y el más bajo es el loess tratado con solución de cementación 0,5 m
Tratamiento con biocompuestos para la mitigación de la erosión del suelo ribereño inducida por corrientes, Dubey, A. et al, 2021.	Arena Fina	Biopolímero-biocemento (biopolímero polisacárido hidrofílico no tóxico producido a partir de Xanthomonas campestris y 5% de carbono cálcico)	Pruebas de penetración de agujas y contenido de carbonato de calcio (CaCO_3). canal hidráulico controlado por flujo, análisis de imágenes.	La resistencia a la erosión mejoró consistentemente con el aumento del tratamiento de biocementación que contenía CaCO_3 hasta un 7% y un valor NPI de 16N/mm. Sin embargo, las muestras biocementadas se rompieron en fragmentos quebradizos durante la prueba de erosión del canal. Por el contrario, el tratamiento con biopolímero resultó en una mejora notable en la velocidad crítica. Sin embargo, una vez que se desalojó la capa biopolimerizada en forma de lámina, se encontró que la tasa de erosión del suelo era equivalente a la de la arena sin tratar.



				Así, se prueba por primera vez la eficacia frente a la erosión hidráulica de un material biocompuesto preparado con biopolímero de baja viscosidad biocemento considerando las ventajas de ambos tratamientos.
Uso de mantillo de bentonita modificado e impregnado de petróleo como estabilizador ecológico de arenas erosionables por el viento, Asadi, P., et al, 2021.	Arena	Bentonita y petróleo	(Método de prueba estándar para el desempeño de sorbentes de adsorbentes), tunel de viento de fuerza lineal	Los resultados mostraron que el espaciado basal de la bentonita modificada aumentó un 162 % en comparación con la bentonita no modificada y pudo adsorber petróleo, 5 veces su peso base. El mantillo producido fue resistente a corrientes de viento de hasta $16,7 \text{ m s}^{-1}$ sin pérdida de suelo durante 5 min, mientras que el suelo arenoso sin tratar comenzó a moverse a una velocidad umbral de $10,3 \text{ m s}^{-1}$ y la bandeja de suelo se erosionó por completo después de 135 s. Los resultados demostraron que el mantillo formulado no solo es respetuoso con el medio ambiente, sino que también es rentable



				para la escala de producción industrial. El uso de este mantillo puede mejorar la calidad del suelo desde un punto de vista físico, químico y biológico.
Estudio experimental sobre el efecto del biopolímero de quitosano en la estabilización de suelos arenosos, Shariatmadari, N., et al. 2020.	Arena	Biopolímeros de quitosano	Prueba de compresión uniaxial no confinada, velocidad de deformación axial, permeabilidad	El quitosano es un estabilizador de suelo efectivo, que es efectivo en suelos arenosos a largo plazo y en suelos arcillosos a corto plazo. Esto se debe a la formación de enlaces electrostáticos. entre las partículas de arcilla y quitosano, lo que no ocurre en la arena porque la superficie de la arena tiene una carga eléctrica baja. Las muestras se curaron en tres condiciones diferentes: condición seca, condición húmeda y saturada en condición del agua (SWC) y probado después de 7, 14 y 28 días de tratamiento. Los resultados de todos los estados de curado a diferentes concentraciones consisten en 0.08%, 0.16%, 24 % y 0.32% de quitosano la resistencia a la compresión aumenta con el



				aumento de la concentración de quitosano, pero disminuye con el aumento del tiempo.
Control y Estabilización de Polvo Fugitivo: Uso Ecológico y Materiales Sostenibles, Toufigh, V., & Ghassemi, P. 2020	Arena	Tres biopolímeros ecoamigables, goma xantana, goma guar y carboximetilcelulosa (CMC) con concentraciones de 0.5%, 1% y 1.5%	Ensayos de resistencia superficial, túnel de viento	En general todas las muestras tratadas con biopolímero exhibieron una mayor resistencia superficial en comparación con las muestras no tratadas. Además, una fuerte correlación entre la fuerza de penetración máxima y la pérdida de peso de las muestras después de la prueba del túnel de viento. Los resultados muestran que el efecto de CMC sobre la mejora de la resistencia superficial y la resistencia a la compresión y la reducción de la pérdida de peso fue considerablemente mayor que los otros biopolímeros.
Efectividad de enmienda orgánica y espesor de aplicación sobre las propiedades de un suelo arenoso y estabilización de arena, Abdalla et al. (2020)	Arena	enmiendas orgánicas - estiércol de aves (PM), estiércol de corral (FYM) y cascarilla de arroz (RH)	pH de las muestras de suelo, carbono total, nitrógeno total, densidad aparente, capacidad de retención de agua, contenido de humedad en aire seco	Los resultados de carbonato de calcio inducido microbianamente y la formación de una capa dura en la superficie del suelo, mostraron que la aplicación de compost de PM y FYM podría ser una práctica efectiva contra la erosión eólica por la resiliencia del suelo, al aplicar



				PM se mostró considerables efectos aparentes en la agregación de partículas de arena y, por lo tanto, podría ser una práctica útil para la estabilización de arena,
Uso de un geopolímero a base de arcilla en la estabilización de suelos de loess, Hanegbi, N., & Katra, I, 2020.	Franco-limosa con un contenido relativamente alto de partículas de limo y arcilla.	Geopolímero compuesto por metacaolín (MK) con una solución de activación que contenía NaOH y silicato de sodio	Túnel de viento, pruebas de tracción	Las concentraciones registradas de material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual que 10 micrometros (PM_{10}) son el resultado de la emisión de polvo de la superficie de las muestras de suelo de loess bajo dos velocidades de viento. No se registró emisión de polvo ni concentración de (PM_{10}) en el suelo del geopolimero a base de arcilla. Se realizaron pruebas de tracción para el geopolímero como estabilizador de suelos. el efecto de la cantidad de MK en el rango de 0-30% en la composición del geopolímero. la muestra de suelo sin MK (0%) dio como resultado una resistencia de menos de 1000 N, la aplicación de un contenido de metacaolin (MK) en el rango de 2,5% a 10%



				mejoró la resistencia del suelo hasta 6000 N. Se obtuvo un cambio significativo para las muestras con MK contenido en el rango 20-30%. Estas muestras dieron como resultado un aumento constante en la resistencia a la presión con rangos máximos de ~11 000 N (20 % MK) a ~25 000 N (30 %MK).
Estabilización de suelos erosionados por el agua mediante el uso de ureasa de origen vegetal, Cuccurullo. A., et al,2019.	Suelo Arcilloso limoso	Precipitación de calcita inducida por enzimas (EICP)	Pérdida de masa de suelo (DM) %	Los resultados de estas pruebas indican que el suelo estabilizado experimenta una pérdida de masa significativamente menor durante la inmersión en comparación con el suelo no estabilizado.



Para sintetizar la información en la Tabla 6. *Tabla resumen de los diferentes tipos de estabilizante encontrados en los artículos, frecuencia de aparición y porcentaje.* **Fuente:** Autores. se presenta la cantidad de veces que se repiten los tipos de estabilizantes utilizados en los diferentes artículos.

Tabla 6. *Tabla resumen de los diferentes tipos de estabilizante encontrados en los artículos, frecuencia de aparición y porcentaje.* **Fuente:** Autores.

TIPO DE ESTABILIZANTE	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Biopolímero	4	26.7%
Precipitación de carbonato de calcio inducida por microbios	3	20%
Geopolímero	2	13.3%
Escoria granulada de alto horno	1	6.7%
Costras biológicas artificiales del suelo	1	6.7%
Cloruro de calcio	1	6.7%
Bentonita y petróleo	1	6.7%
Enmiendas orgánicas	1	6.7%
Precipitación de calcitas inducida por enzimas	1	6.7%
TOTAL	15	100%

De acuerdo a la tabla 7 se puede observar que el estabilizante más investigado fue el de biopolímero con una frecuencia de cuatro artículos, dentro de estos se encuentra el caso del aglutinante de biopolímero de polisacárido hidrofílico (HPB), los resultados muestran que este mejoró significativamente las propiedades mecánicas de la arena natural debido a la fuerte unión entre partículas que ofrece la estructura de la membrana de red, además aumentó la resistencia a la erosión de la arena modificada y la capacidad de resistir la erosión de la capa superior del suelo por los efectos combinados de la cobertura de la superficie y una fuerte conexión de unión intergranular. Este aglutinante proporcionó un ambiente apropiado para el crecimiento de la vegetación y disminuyó significativamente las tasas de erosión después de que se estableció la vegetación; lo anterior se encuentra detallado en la Figura 9.

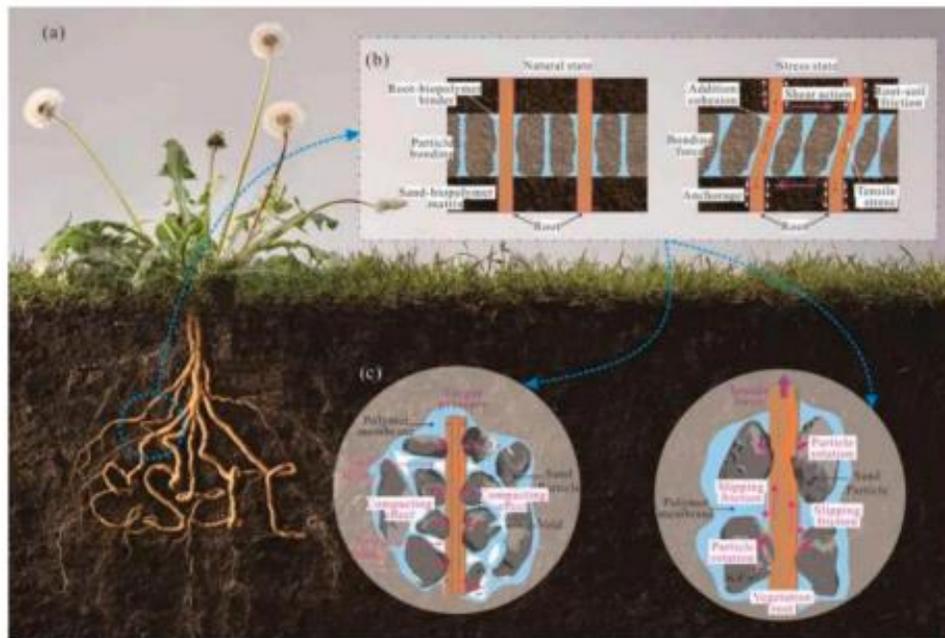


Figura 9. (a) El mecanismo de arena-biopolímero-matriz raíz; (b) Transformación de tensiones en el plano de falla y (c) interacción raíz-partícula de arena-biopolímero. **Fuente:** Che, W., et al, 2022.

El siguiente estabilizante con más frecuencia es la precipitación de carbonato de calcio con una recurrencia de tres artículos, se encontró que al usar este tratamiento se forman en el suelo estructuras de doble capa, que incluye la capa superior de la corteza dura en la superficie del suelo y la capa cementada débil inferior. La corteza dura del suelo unida a CaCO_3 contribuyó principalmente a mejorar la resistencia a la erosión, esto se encuentra descrito en la Figura 10.

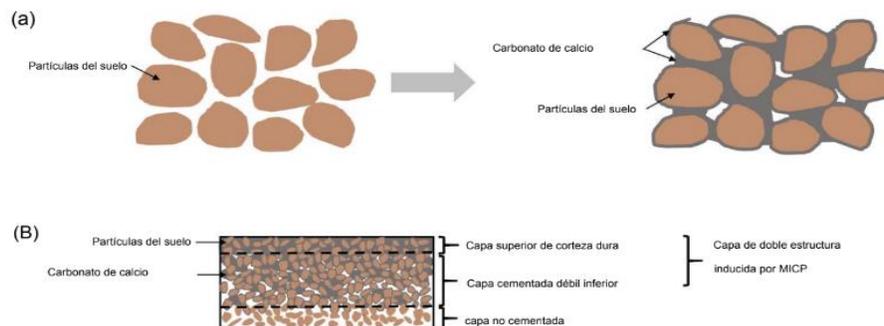


Fig. 15. Diagramas esquemáticos del mecanismo de mejora de las propiedades físico-mecánicas del loess mediante el tratamiento con MICP, (a) mecanismo de cementación con MICP, (b) Estructura de doble capa inducida por MICP.

Figura 10. Diagramas esquemático del mecanismo de mejora de las propiedades físico-mecánicas del suelo mediante el tratamiento MICP. **Fuente:** Cheng, Y., et al, 2021.

posteriormente se encuentra el geopolímero con una frecuencia de dos artículos, dentro de este método se encontró el geopolímero a base de ceniza volcánica, en el cual los resultados mostraron que la cobertura de las partículas del suelo por el enlace geopolimérico determina la resistencia mecánica y la eficiencia del método de tratamiento. Al reducir el contenido de finos del suelo se presenta una mejora en la resistencia a la compresión esto se atribuye a un mayor recubrimiento de partículas y una cementación más eficiente inducida por la menor área superficial específica de las muestras de suelo; el ejemplo de esto se observa en la Figura 11.

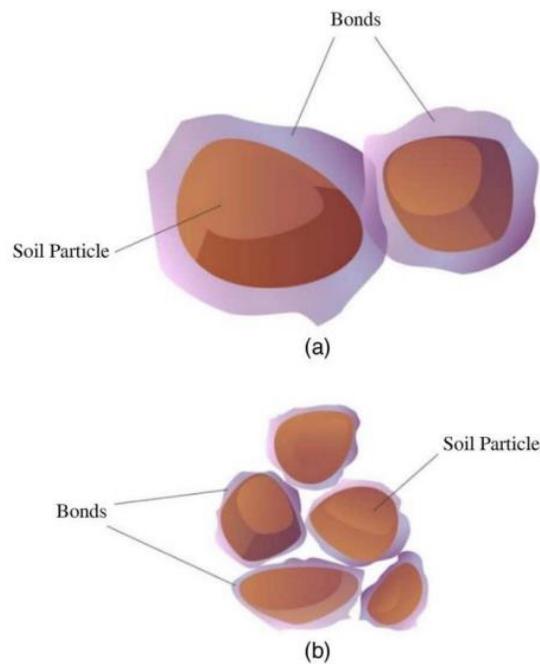


Fig. 7. Esquemas de estabilización geopolimérica de (a) grano grueso; y (b) tipos de suelo de grano fino.

Figura 11. Esquema de estabilización geopolimérica. **Fuente:** Shariatmadari, N., et al, 2021.

Finalmente, para los demás tipos de estabilizantes tales como, escoria granulada de alto horno, costras biológicas artificiales del suelo, cloruro de calcio, bentonita y petróleo, enmiendas orgánicas y precipitación de calcitas inducida por enzimas se encontraron con una incidencia de un artículo.



5. CONCLUSIONES

Al analizar las técnicas que permiten mitigar la erosión en diferentes tipos de suelos con materiales eco-amigables para su estabilización, por medio de la presente revisión bibliográfica de estudios científicos relacionados con el tema, se espera que las conclusiones obtenidas resulten útiles para la comunidad geotécnica, académica, autoridades ambientales e investigadores que deseen realizar futuras investigaciones relacionadas con la erosión de suelos. Además, la generación de esta base de datos con información sólida y actualizada permitirá ayudar a las comunidades que se ven afectadas por esta problemática.

1. De acuerdo con los artículos seleccionados se encontraron diferentes soluciones eco-amigables empleadas para mitigar la erosión de los suelos, entre ellas se encontró el uso de Escoria Granulada de Alto Horno (GBFS) y Cloruro de Calcio (CaCl_2), la cual aumentó la resistencia a la compresión no confinada.

Otro método hallado fue el de Costras biológicas artificiales del suelo (BSC), este estudio demostró que después de 12 meses de incubación este se pudo desarrollar bien en los diferentes tratamientos del suelo alcanzando una mayor cobertura, además el estudio indicó que cubrir la arena con sustratos de suelo mejoró las tasas de recuperación de BSC en las condiciones de campo.

En el caso de los estudios con precipitación de carbonato de calcio inducida por microbios (MICP) y biocementación, se evidenció que los ciclos de tratamiento MICP y la concentración de la solución de cementación influyeron significativamente en la resistencia a la erosión. En general, la cantidad de suelo erosionado disminuye al aumentar los ciclos de tratamiento de MICP. Esto se debe a que cuantos más ciclos de tratamiento dan lugar a un mayor contenido de CaCO_3 , una capa de corteza dura más gruesa y una mayor resistencia de la estructura del suelo. Se encuentra que el suelo tratado con solución de cementación podría tener la mejor resistencia a la erosión.

Se encontró también el uso de diferentes geopolímeros; en el caso de geopolímero a base de ceniza volcánica demostró ser eficaz para la estabilización superficial de suelos erosionables



por el viento, sin embargo, este método es más efectivo para suelos no plásticos con menos contenido de finos, por otro lado, el geopolímero a base de arcilla expuso un alto potencial de aplicación como producto de control de polvo, así como estabilizador de suelos.

Finalmente, el uso del método de precipitación de calcita inducida por enzimas (EICP) indicó que el suelo estabilizado experimenta una pérdida de masa significativamente menor durante la inmersión en comparación con el suelo no estabilizado.

2. En los artículos se encontró que el método más investigado fue el uso de los biopolímeros, dentro de ellos se encontraron el aglutinante de biopolímero de polisacárido hidrofílico (HPB), biopolímero-biocemento, biopolímero de quitosano, biopolímero de goma guar y biopolímero de carboximetilcelulosa. Este método resultó ser eficaz de forma general en todas las muestras tratadas, ya que estas exhibieron una mayor resistencia superficial en comparación con las muestras a las que no se les aplicó biopolímeros.

3. Otro de los métodos más estudiados en los artículos escogidos fue la precipitación de carbonato de calcio inducida por microbios (MICP), este se puede adaptar bien al medio ambiente y al utilizar procesos biogeoquímicos naturales para mejorar las propiedades del suelo disminuye significativamente la energía incorporada y las emisiones de carbono en comparación con métodos tradicionales como la estabilización con cemento, además el proceso de MICP no tiene toxicidad y permanece con un pH adecuado, por lo que casi no tiene efectos negativos en el medio ambiente.

4. En la revisión de la bibliografía referente a las técnicas eco-amigables para el control de la erosión, se encontró que, el tema investigado es de gran importancia. sin embargo, en Colombia no se evidenciaron estudios de estas técnicas, por esta razón resulta indispensable continuar con la investigación e incentivar su estudio a nivel local. Actualmente, debido a los diferentes problemas ambientales, se necesita lograr un cambio real y duradero, por tanto, la exploración e indagación de técnicas de control de la erosión que sean menos agresivas con el ambiente resulta necesario. Los diferentes métodos analizados demostraron ser altamente efectivos en las pruebas de laboratorio, por tanto, seguir su investigación y su posterior aplicación en el campo puede brindar soluciones al problema de erosión de suelos y la estabilización de este. Además, que hacer uso de materiales que son agradables para el



medio ambiente, estos tendrán un bajo impacto en los ecosistemas y este no se verá alterado negativamente.

5. A nivel local se recomienda realizar experimentos con diferentes muestras de suelos de Cartagena de Indias para estudiar su grado de erosividad y así ejecutar nuevas investigaciones usando biopolímeros, precipitación de carbonato de calcio inducida por microbios (MICP), geopolímeros, escoria granulada de alto horno, costras biológicas artificiales del suelo, cloruro de calcio, bentonita, petróleo y enmiendas orgánicas entre otros estabilizantes eco-amigables, esto con el fin de brindar solución a la problemática de erosión en los suelos en la ciudad.



6. BIBLIOGRAFIA

- Liu, B., Xie, Y. H., Tang, C. S., Pan, X. H., Jiang, N. J., Singh, D. N., ... & Shi, B. (2021). Bio-mediated method for improving surface erosion resistance of clayey soils. *Engineering Geology*, 293, 106295.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124.
- Hincapié, E., & Ramírez, F. A. (2013). Riesgo a la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).
- Trujillo-González, J. M., Mahecha, J. D., & Torres-Mora, M. (2018). El recurso suelo; un análisis de las funciones, capacidad de uso e indicadores de calidad. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*.
- IDEAM, U. (2015). Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. Bogotá DC, Colombia: Instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales–Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible–Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023648/Sintesis.pdf>.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay.
- Seybold, C. A., Herrick, J. E., & Brejda, J. J. (1999). Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Science*, 164(4), 224-234.
- Arshad, M. A., & Coen, G. M. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1-2), 25-31.
- Rossiter, D. G. (1996). A theoretical framework for land evaluation. *Geoderma*, 72(3-4), 165-190.



- Clasificación de Suelos | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s. f.). Home | Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/>
- Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo.
- Hidalgo, J. C. G. (1998). Los procesos de erosión del suelo: hechos, mitos y paradojas. *Geographicalia*, (36), 47-65.
- Ramirez Celis, F. G. (2020). Uso de bioingeniería en suelos que han sido afectados por procesos erosivos en canteras en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá en el sector de Usaquén
- León Peláez, J. (2001). Estudio y control de la erosión hídrica. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en Zonas Tropicales, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Cisneros, J. M., & Cholaky, C. (2012). Erosión hídrica, Principio y técnicas de manejo; co-authors chap. 7: Cantero, J, Núñez, C. Amuchástegui, A., co-auth.
- Puertas, J. Q. (1987). Erosión eólica. Valoración experimental. *Papeles de Geografía*, (12).
- Alba, S. D., Alcázar Torralba, M., Cermeño Martín, F., & Barbero Abolafio, F. (2011). Erosión y manejo del suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos.
- Cerdà, A. (2001). La erosión del suelo y sus tasas en España. *Ecosistemas*, 10(3).
- Clérici, C., & García Préchac, F. (2001). Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia-Sitio en Reparación*, 5(1), 92-103.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2016). *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning.
- Liu, J., Shi, B., Jiang, H., Huang, H., Wang, G., & Kamai, T. (2011). Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. *Engineering Geology*, 117(1-2), 114-120.



- Zuber, S. S., Kamarudin, H., Abdullah, M. M. A. B., & Binhussain, M. (2013). Review on soil stabilization techniques. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(5), 258-265.
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 42(4), 223-237.
- Behnood, A. (2018). Soil and clay stabilization with calcium-and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, 17, 14-32.
- Pandey, A., & Rabbani, A. (2017) Stabilisation of pavement subgrade soil using lime and cement, *international Journal of Engineering and Technology*, 4(6), 5733-5735.
- Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander, (UIS).
- Emeka, A. E., Chukwuemeka, A. J., & Okwudili, M. B. (2018). Deformation behaviour of erodible soil stabilized with cement and quarry dust. *Emerging Science Journal*.
- Shariatmadari, N., Mohebbi, H., & Javadi, A. A. (2021). Surface Stabilization of Soils Susceptible to Wind Erosion Using Volcanic Ash–Based Geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(12), 04021345.
- Cuccurullo, A., Gallipoli, D., Bruno, A. W., Augarde, C., Hughes, P., & Borderie, C. L. (2019, July). Soil stabilization against water erosion via calcite precipitation by plant-derived urease. In *National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering* (pp. 753-762). Springer, Cham.
- Lakkimsetti, B., & Nayak, S. (2022). Experimental Investigation and Performance Evaluation of Lithomargic Clay Stabilized with Granulated Blast Furnace Slag and Calcium Chloride. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 8(1), 1-16.
- Che, W., Liu, J., Hao, S., Ren, J., Song, Z., & Bu, F. (2022). Application of colloid-sand coating treated by a hydrophilic polysaccharide biopolymer material for topsoil stability control. *Geoderma*, 424, 115994.



- Dubey, A. A., Ravi, K., Shahin, M. A., Dhimi, N. K., & Mukherjee, A. (2021). Bio-composites treatment for mitigation of current-induced riverbank soil erosion. *Science of The Total Environment*, 800, 149513.
- Asadi, P., Heidari, A., Alaie, E., Naidu, R., Asadi, H., & Mahmoodi, S. (2021). Use of modified and petroleum-impregnated bentonite mulch as an eco-friendly stabilizer of wind erodible sands. *Aeolian Research*, 53, 100749.
- Shariatmadari, N., Reza, M., Tasuji, A., Ghadir, P., & Javadi, A. A. (2020). Experimental study on the effect of chitosan biopolymer on sandy soil stabilization.
- Abdalla, M. A., Endo, T., Maegawa, T., Mamedov, A., & Yamanaka, N. (2020). Effectiveness of organic amendment and application thickness on properties of a sandy soil and sand stabilization. *Journal of Arid Environments*, 183, 104273.
- Zhao, Y., Xu, W., & Wang, N. (2021). Effects of covering sand with different soil substrates on the formation and development of artificial biocrusts in a natural desert environment. *Soil and Tillage Research*, 213, 105081.
- Devrani, R., Dubey, A. A., Ravi, K., & Sahoo, L. (2021). Applications of biocementation and bio-polymerization for aeolian erosion control. *Journal of Arid Environments*, 187, 104433.
- Dubey, A. A., Devrani, R., Ravi, K., Dhimi, N. K., Mukherjee, A., & Sahoo, L. (2021). Experimental investigation to mitigate aeolian erosion via biocementation employed with a novel ureolytic soil isolate. *Aeolian Research*, 52, 100727.
- Hanegbi, N., & Katra, I. (2020). A clay-based geopolymer in loess soil stabilization. *Applied Sciences*, 10(7), 2608.
- Cheng, Y. J., Tang, C. S., Pan, X. H., Liu, B., Xie, Y. H., Cheng, Q., & Shi, B. (2021). Application of microbial induced carbonate precipitation for loess surface erosion control. *Engineering Geology*, 294, 106387.
- Toufigh, V., & Ghassemi, P. (2020). Control and stabilization of fugitive dust: using eco-friendly and sustainable materials. *International Journal of Geomechanics*, 20(9), 04020140.