

NEW TECHNOLOGIES IN THE STABILIZATION OF SOILS FOR HIGHWAYS IN THE WORLD. A SYSTEMATIC REVIEW DURING THE YEARS 2012-2022.

1Néstor A. Araujo Salirrosas1 N00167591@upn.pe, 2Antony E. Zavala Morales N00173748@upn.pe

3Universidad Privada del Norte, melving.rivera@upn.edu.pe, 4Universidad Privada del Norte, marlon.valderrama@upn.edu.pe

5Universidad Privada del Norte, grant.llaque@upn.edu.pe, 6Universidad Privada del Norte, flor.calvanapon@upn.edu.pe

Abstract - The present work will include an investigation on the different uses of new technologies in stabilization, with the need to opt for an optimal terrain or soil for passability as evidenced in different parts of the world, which leads to the search for alternative solutions to This problem affects in one way or another the quality of life of people. The objective is to know about the use of these new technologies in the stabilization of soils designed for highways, based on a systematic review in the last 10 years, with data obtained through different sources such as Redalyc, ScienceDirect, Scopus, Scielo, Springer, among others. Since having land with excellent stabilization for road traffic guarantees safety and comfort from a good base, providing a better quality of life for people. The review was carried out under the IMRD – PRISMA methodology, considering the APPA writing and citation standards. The results of the evaluation of the use of new technologies and their effects on the soil for highways in the world detail that these materials have a positive impact on the characteristics of the treated soil, being the hydrophobic organosilane technology with an improvement index of 533% in cbr stability.

Keyword: *use of additives, additives, compounds, soil stabilization, road compounds.*

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.147>

ISBN: 978-628-95207-3-6 ISSN: 2414-6390

NEW TECHNOLOGIES IN THE STABILIZATION OF SOILS FOR HIGHWAYS IN THE WORLD. A SYSTEMATIC REVIEW DURING THE YEARS 2012-2022.

NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA CARRETERAS EN EL MUNDO. UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DURANTE LOS AÑOS 2012-2022.

1Néstor A. Araujo Salirrosas1 N00167591@upn.pe, 2Antony E. Zavala Morales N00173748@upn.pe

3Universidad Privada del Norte, melving.rivera@upn.edu.pe, 4Universidad Privada del Norte, marlon.valderrama@upn.edu.pe

5Universidad Privada del Norte, grant.llaque@upn.edu.pe, 6Universidad Privada del Norte, flor.calvanapon@upn.edu.pe

Resumen - El presente trabajo comprenderá una investigación sobre los diferentes usos de nuevas tecnologías en la estabilización, con necesidad de optar por un terreno o suelo óptimo para transitabilidad como se evidencia en diferentes partes del mundo, lo cual con lleva a buscar alternativas de solución a este problema que afecta de una manera u otra la calidad de vida de las personas. El objetivo es conocer sobre el uso de estas nuevas tecnologías en la estabilización de suelos proyectados para carreteras, a partir de una revisión sistemática en los últimos 10 años, con datos obtenidos a través de distintas fuentes como Redalyc, ScienceDirect, Scopus, Scielo, Springer, entre otros. Puesto que tener un terreno con una excelente estabilización para tránsito vial garantiza seguridad y confort desde una buena base, proporcionando una mejor calidad en la vida de las personas. La revisión se realizó bajo la metodología IMRD – PRISMA, considerando las normas de redacción y citas APPA. Los resultados de la evaluación del uso de nuevas tecnologías y sus efectos en el suelo para carreteras en el mundo detallan que estos materiales inciden de una manera positiva en las características del suelo tratado, siendo la tecnología de organosilano hidrofóbico con índice de mejora de 533% en estabilidad del cbr.

Palabras Clave—Uso de aditivos, aditivos, compuestos, estabilización de suelos, consolidación, carreteras.

Abstract - The present work will include an investigation on the different uses of new technologies in stabilization, with the need to opt for an optimal terrain or soil for passability as evidenced in different parts of the world, which leads to the search for alternative solutions to This problem affects in one way or another the quality of life of people. The objective is to know about the use of these new technologies in the stabilization of soils designed for highways, based on a systematic review in the last 10 years, with data obtained through different sources such as Redalyc, ScienceDirect, Scopus, Scielo, Springer, among others. Since having land with excellent stabilization for road traffic guarantees safety and comfort from a good base, providing a better quality of life for people. The review

was carried out under the IMRD – PRISMA methodology, considering the APPA writing and citation standards. The results of the evaluation of the use of new technologies and their effects on the soil for highways in the world detail that these materials have a positive impact on the characteristics of the treated soil, being the hydrophobic organosilane technology with an improvement index of 533% in cbr stability.

Keywords—use of additives, additives, compounds, soil stabilization, road compounds.

I. INTRODUCCIÓN

El problema de los caminos naturales no pavimentados se puede atribuir a una serie de factores importantes, como la necesidad de un mantenimiento frecuente e intenso, el reemplazo de capas para compensar la pérdida de material, la compactación y restauración morfológica del camino (eliminación de huellas, túnel para permitir el drenaje, etc.). La evidencia real confirma que un camino no pavimentado apropiadamente estable satisface la demanda de tráfico mejor y por más tiempo que un camino natural no mejorado. Como respuesta a este problema se opta por el uso de nuevas tecnologías alternativas para la construcción de rutas de tráfico donde la estabilización química es una opción viable por razones económicas, estéticas y operativas. Esta alternativa altera química y físicamente el suelo y, por lo tanto, tiene el mismo impacto en el medio ambiente que en el caso de la infraestructura desarrollada con productos tradicionales. Sin embargo, se cree que los efectos producidos por la estabilización química son mucho menores que los producidos, por ejemplo, por el uso de asfalto como materia prima para la construcción de pavimentos. [1]

En la actualidad ya es un hecho más que una realidad el uso de nuevas tecnologías en los diferentes proyectos viales, considerando en algunos casos una aplicación sostenible de costo – beneficio en las capas libres de una carretera. Así mismo hay estabilizadores no tradicionales que mejoran las

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.147>

ISBN: 978-628-95207-3-6 ISSN: 2414-6390

propiedades mecánicas de los agregados que no cumplen con los requisitos de diseño, tal es el caso de un estudio basado en organosilano, el otro en lignosulfonato. Donde las pruebas de laboratorio (microscopía delgada, cristalografía de rayos X, fluorescencia de rayos X, prueba triaxial con carga repetida) caracterizan los materiales de piedra y el rendimiento de los agregados. El estudio también examina el desempeño de tres secciones de base de carretera típicas, especialmente formuladas para la práctica real y tratadas con agua (sin tratar), organosilano y sulfonato de lignina, respectivamente. Solo están expuestos a las condiciones climáticas; No se utilizan superposiciones ni efectos de tráfico. [12]

Es vital considerar los efectos del uso adecuado y específico de estas tecnologías para el tratamiento de suelos pensados para obras viales, teniendo en cuenta la conservación del medio ambiente y la propuesta de diseño planteada, por ello unas pruebas realizadas confirmaron que los estabilizadores químicos generalmente evaluados no presentan ningún peligro ambiental. Por ejemplo, en términos de toxicidad, biodegradación y formación de sólidos. Se explica que, para tener un impacto mínimo o nulo en el medio ambiente, cada proyecto específico debe ser evaluado, desde características geográficas, demográficas, hidrológicas, tierras de cultivo, flora y fauna del entorno del proyecto. Esto demuestra que la estabilización química con estos compuestos no cambia significativamente el sustrato del suelo desde un punto de vista ecológico. [21]

La estabilización de suelos se ha utilizado en las últimas décadas para tratar suelos de bajas características técnicas, tales como: baja capacidad de carga y alta capacidad de expansión para su instalación en movimiento de tierras. Por ello también se realiza una evaluación de los suelos de subrasante con baja resistencia de soporte que son incapaces de soportar cargas pesadas y se consideran inadecuados para la construcción, considerando la aplicación de nano químicos a fin de mejorar suelos inestables o expansivos y encontrar una cantidad óptima de estabilizador que proporcione la máxima resistencia y controle la compresión y la permeabilidad. [20]

Debido a ello la utilización de nuevas tecnologías para mejorar estabilidad de suelos es una posibilidad que se plantea en todo el mundo. En Colombia, donde su principal medio de transporte es por carretera, la necesidad de infraestructura vial va en aumento demandando materiales de calidad, que muchas veces son de difícil consecución. Ante tal situación surgen alternativas constructivas, entre ellas, la estabilización de suelos con diversos agentes estabilizantes. [3]

Por lo antes mencionado, en este trabajo evaluaremos ¿Qué nuevas tecnologías se usan en la estabilización de suelos para carreteras en el mundo 2012 – 2022? Denotamos que el objetivo principal de esta revisión sistemática es conocer las nuevas tecnologías y su aplicación en la estabilización de suelos para carreteras alrededor del mundo, tomando en cuenta el análisis de diferentes artículos de investigación científica durante los últimos 10 años).

Se realiza este estudio de revisión sistemática sobre el

objetivo previamente mencionado, teniendo en cuenta su factibilidad en el medio ambiente al momento de elegir el aditivo, asimismo su costo - beneficio en cualquier lugar del mundo donde se requiera su uso, para que con ello se pueda obtener suelos para vías de buena calidad y que proporcione beneficios a los pobladores que necesiten movilizarse. Por consiguiente, esta revisión se realiza con la finalidad de analizar las teorías planteadas por todo el mundo sobre el uso de estos materiales y adquirir un conocimiento más amplio sobre los mismos en la estabilización de suelos, dicha investigación sirve para dar respuesta a otras preguntas, como el tema de estabilización con aditivos que se plantea en distintos países de acuerdo a sus normas de diseño y conservación del medio ambiente. Por último, el presente estudio se realiza a fin de brindar apoyo a investigadores interesados en conocer los diferentes usos de las nuevas tecnologías en la estabilización de bases y subbases o terreno natural.

II. METODOLOGÍA

Se realizó el presente trabajo de “revisión sistemática de la literatura científica” mediante artículos de investigación relacionados con las variables a estudiar, nuevas tecnologías en la estabilización de suelos para carreteras, pretendiendo recolectar la información de manera precisa, objetiva y ordenada, obedeciendo ciertos criterios de estructuración IMRD-PRISMA(Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), [31], así como haber sido publicados en el periodo de 2012 a 2022, también que todos estos artículos procedan de centros de búsqueda como: Scopus, ScienceDirect, Scielo, Google Académico, Redalyc, Researchgate, Springer, Studies & Dialnet, las cuales son fuentes de información para la investigación científica, técnica y médica. Que proporcionan datos bibliográficos de resúmenes y citas de artículos o revistas de alta calidad científica al rededor del mundo, considerando los diferentes idiomas y especialidades, las mismas que nos proporcionan datos importantes para la realización competente del trabajo.

En referencia a los centros de búsqueda ya descritos, los mismos que proporcionaron información respectiva de las variables en estudio que son las nuevas tecnologías y la estabilización de suelos para carreteras, considerando los datos de diferentes partes del mundo, y profundizando en el campo de búsqueda y obteniendo mejores resultados.

Con la finalidad de agilizar la búsqueda de información se optó por estrategias de búsqueda que fue utilizar las palabras clave que coinciden con las variables en estudio en distintos idiomas. Las palabras clave que se utilizaron en la investigación con sus conectores lógicos limitantes son: uso de aditivos, aditivos, compuestos, estabilización de suelos, consolidación, carreteras, use of additives, additives, compounds, soil stabilization, road compounds. Además, adicionalmente a ello, para determinar con que información se realizará la presente investigación, se realizó la formulación de ecuación de búsqueda

SCIENCEDIRECT

TABLA. 2 ESTRATEGIAS O MÉTODOS DEL USO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Título del trabajo de Investigación	Nombre de la Tecnología	Descripción de la estrategia o método	Implicancias o Conclusiones
Estabilización de Subrasantes con Productos Químicos.	Tecnología; Aceite Sulfonado, Cemento Aditivado, Enzima Orgánica Hidrofobante	La adición de productos químicos al suelo de subrasante se perfila como una solución para estudiar, pues con esta metodología se aprovechan las condiciones iniciales de los terrenos procurando elevar la capacidad portante del suelo, con la respectiva densificación de la estructura y las implicaciones que esto acarrearía en el ingreso de agua al suelo. Por ello se efectuaron ensayos pertinentes para conocer las diferentes propiedades de los suelos con y sin tratamiento y poder establecer el respectivo análisis comparativo.[4]	La realización con éxito del tratamiento con cualquier producto químico es necesario conocer al menos el tipo de suelo, ya que con este factor es posible determinar el tipo de producto que se debe utilizar y la dosificación pertinente, sin olvidar tales factores como la homogenización del producto en la mezcla suelo agua y la humedad natural del suelo.
Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad	Tecnología: Polímeros, Aceites Sulfonatos, Sales, Silanos, Puzolanas y Enzimas	La estabilización química se presenta como una solución técnica, que consiste en el uso de aditivos químicos para mejorar las propiedades ingenieriles del suelo En esta metodología se evalúan distintas tecnologías de estabilización bajo condiciones de intemperismo acelerado, para establecer su efecto en el desempeño y durabilidad de suelos viales, así como posibles impactos sobre la biodiversidad en comparación con el uso de materiales tradicionales de construcción [7]	Los materiales evaluados muestran desempeños adecuados, al presentar mayores resistencias mecánicas respecto al suelo natural, destacándose los productos de naturaleza puzolánica. Además, se observa que, el suelo conserva el aspecto del suelo natural, lo cual representa ventajas desde el punto de vista ambiental.
Evaluación de la expansión en suelos presaturados.	Tecnología: Cal, Cemento, Ceniza Volante	El método de presaturación como técnica de mejoramiento de suelos es utilizado cuando los volúmenes de suelo a reemplazar son considerables, por lo que es importante predecir las deformaciones y otras características como la compactación - expansión unidimensional de un suelo expansivo estabilizado con este método, además es necesario utilizar metodologías existentes para obtener una gráfica adecuada de su comportamiento. [5]	El estudio pudo concluir que, al aumentar el grado de saturación inicial del material, el ángulo de fricción disminuye en el suelo, esto se puede atribuir a que el agua añadida es la adecuada para el enlace entre partículas de suelo.
Los materiales alternativos estabilizados y su impacto ambiental	Tecnología: Hidróxido de cal y Cemento	El estudio se basa en una metodología experimental con el proceso de fabricación de especímenes a partir de mezclas de los aditivos como el hidróxido de cal y cemento con el suelo y sus características ideales para muestra de estudio, a ello se le aplicaron pruebas mecánicas, análisis de ciclo de vida e impactos en el medio ambiente [9]	La capacidad de carga de los suelos estabilizados con Hidróxido de calcio alcanza resultados similares a los que se estabilizaron con cemento. Incluso en este caso, la resistencia obtenida con el Hidróxido de calcio fue en promedio mayor que la del cemento. Además de que en promedio absorben más agua que el concreto.
Desempeño de un material granular estabilizado con cemento cuando se aplica carga a compresión	Tecnología: Cemento hidráulico Portland	La metodología utilizada para analizar el desempeño del material granular estabilizado con cemento cuando se aplica pruebas de golpes de compactación y la relación arcilla/arena. Además, los factores estudiados fueron el contenido de cemento y la humedad del suelo que pueden implicar en la estabilización de capas base clasificadas para carreteras por AASHTO. [10]	El estudio corrobora los rangos sugeridos para contenido de cemento para capas de base estabilizadas en la clasificación de carreteras por la AASHTO, de tal forma que la relación de 150 Kg. /m ³ , puede considerarse como adecuada al momento de diseñar este tipo de materiales que sirven de soporte en la estructura que se conforma como soporte de vías.
Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia	Tecnología: aditivos para estabilización química	Esta metodología tiene origen empírico, basado en los trabajos de Turnbull, Foster & Alhvin (1966) [10], para la USACE y basados en los datos de la pista de prueba AASHTO, a fin de determinar espesores para proteger a la subrasante de deformaciones permanentes causadas por la repetición de las cargas. [15]	El estudio evidencia que la deformación vertical sobre la subrasante debe ser controlada en la concepción del proyecto, próxima al límite establecido en pavimentos de larga duración.
Análisis de las propiedades físico mecánicas de suelos existentes como subrasante en la ciudad de Cúcuta, municipio de Los Patios y Villa del Rosario.	Tecnología: aditivos convencionales	La estrategia consistió en analizar muestras de suelo provenientes de distintos municipios haciendo la respectiva caracterización para así poder determinar la calidad de estos suelos tratados y su uso como subrasante en proyectos viales y así comprender mejor su comportamiento en proyectos viales debido a que se presenta un régimen de lluvias bimodal, es decir está sometida a periodos de lluvia y clima cálido. [17]	Se determinaron las propiedades físicas y mecánicas del suelo mediante las pruebas de resistencia a la compresión confinada, ensayos de clasificación, pruebas de expansión, y el CBR correspondiente para cada muestra

Organosilane and lignosulfonate as innovative stabilization techniques for crushed rocks used in road unbound layers	Tecnología: Organosilane and Lignosulfonate	La técnica de estabilización de rocas trituradas se llevó a cabo tanto en el laboratorio como en el campo. Los ensayos de laboratorio comprendieron caracterización geológica mediante microscopía de sección delgada. Ya que en experimentos previos que investigaron la modificación de la resistencia y la densidad de caminos sin pavimentar usando lignosulfonato mostraron resultados prometedores para suelos limosos y arcillosos.[19]	La investigación demostró que tanto el organosilano como el lignosulfonato eran soluciones eficaces para mejorar las propiedades de los materiales para los que no estaban especialmente diseñados, es decir, las rocas trituradas utilizadas en las capas no unidas de las carreteras.
Evaluación ambiental del efecto del uso de aditivos químicos en la estabilización de suelos viales	Tecnologías de estabilización química	La técnica de estudio consiste en evaluar un suelo de estudio que fue tomado de una vía no pavimentada el cual se describe como un suelo arcilloso de color pardo rojizo. Para cada serie de ensayos se realizaron probetas bajo las condiciones óptimas obtenidas en el ensayo de compactación de la muestra natural y las restantes aditivadas con 7 productos químicos de diferente naturaleza. [21]	La investigación confirmó que en general los estabilizadores químicos evaluados no presentan peligro para el medio ambiente en términos de toxicidad, biodegradabilidad y generación de material particulado. Además, se encontraron mejoras en propiedades como la densificación y la resistencia mecánica.
Systematic Studies on Defining Interaction Process of Clay Minerals for Achieving Synthetic Mixtures as Composite Materials Applied in Stabilization Works	Tecnología: Arcilla bentonítica con montmorillonita - arcilla ilita y arcilla caolinita	La técnica se enfoca en el análisis de los cambios de varias propiedades geotécnicas dependiendo de los componentes de las mezclas biminales y la interacción existente entre varios tipos de minerales. Los cuales se han determinado correlaciones de índices geotécnicos del suelo como límites de plasticidad, distribuciones granulométricas, hinchamiento lineal y composición químico-mineralógica. [28]	Las investigaciones indicaron en su mayor parte que las características físicas que se han estudiado sobre el mineral arcilloso, las mezclas no varían proporcionalmente a la cantidad de cada componente, debido a la interacción existente entre varios tipos de minerales que presenta el suelo a estabilizar.
Physio-Chemical Properties, Consolidation, and Stabilization of Tropical Peat Soil Using Traditional Soil Additives — A State of the Art Literature Review	Tecnología: Aditivos tradicionales Cemento y Cal	La mejora del suelo de turba es desafiante y costosa, y requiere una cantidad adicional de estabilizador para iniciar el proceso de estabilización. Sin embargo, la dosificación óptima y umbral del estabilizador para la turba también es una tarea difícil de predecir debido a varios factores que afectan el proceso de estabilización.[22]	La implicación de las pruebas de cono de caída y laminación de roscas para la determinación de los límites de Atterberg de turba fibrosa, consolidómetro efectivo para turba y utilización de aditivos tradicionales para la estabilización de suelos de turba.
Loess Stabilization by Means of SiO ₂ Nanoparticles	Tecnología: Nanopartículas de SiO ₂	La estabilización del suelo es el método por el cual se mejoran las propiedades de unión del loess a través de la creación de nuevos enlaces estructurales mediante la mezcla del suelo con materiales aglutinantes como el cemento, cal, cenizas volantes y silicato de sodio, las propiedades mejoradas del loess estabilizado han sido principalmente atribuidas a geles hidratados en la matriz del suelo-cemento. [23]	La nanosílice tiene un buen efecto de estabilización sobre el loess, y el loess estabilizado con nanosílice tiene una alta resistencia y buenas características en tensión-deformación.
Estabilización de suelos y materiales granulares en caminos de bajo volumen de tránsito, empleando productos no tradicionales	Tecnología: Cemento hidráulico - Productos asfálticos - Cal	Las técnicas de la aplicación de un producto estabilizador debe ser el primer paso a definir. Generalmente, se busca reducción de polvo, conservación de finos, aporte estructura. En este proceso pueden intervenir muchas variables como el tipo desuelo o material existente, características de la ruta, clima y otros. Se realizan aplicaciones de productos estabilizadores tradicionales principalmente, ya que los esfuerzos por conocer, investigar o que estabilizadores no tradicionales aplicar, han sido aislados y poco divulgados. [25]	La mejora en las condiciones de transitabilidad de caminos no pavimentados y la reducción en la generación de polvo lo cual se traduce en el logro de un fin primordial, que es provocar un impacto social positivo en la seguridad vial y salud de los ciudadanos que habitan en las cercanías de este tipo de redes de caminos de grava o tierra.
Moisture-dependent resilient modulus of chemically treated subgrade soil	Tecnología: Bentonita-magnesio-alcalinización (BMA).	Las técnicas experimentales utilizadas para obtener la relación módulo resiliente-succión del suelo de subrasante tratado, donde se usa como aditivo un diseño óptimo de (BMA). Además del empleo del marco triaxial cíclico con sistema ELDYN para medir M R valores y la succión, también se observó una curva característica bimodal del agua del suelo tratado con aditivo BMA sin calentar y pretratamiento en condiciones calentadas (BMAH) debido a la presencia de productos cementicios.[26]	El suelo de subrasante estabilizado tratado con los aditivos BMA y BMAH mostró claramente una significativa mejora de la rigidez bajo un alto nivel de succión, por lo que la variación estacional en el contenido de humedad es fundamental para la succión y la rigidez de suelo de subrasante.
Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture	Tecnología: Lignosulfonato (LS)	La estrategia para conocer porque un suelo expansivo remodelado fue modificado o alterado por una mezcla no tradicional, lignosulfonato (LS). Para lograr este objetivo, las muestras de suelo expansivo no tratadas y tratadas con LS se examinaron microscópicamente utilizando difracción de rayos X (XRD), entre otros, con el interés de identificar y comparar cualquier cambio físico y químico entre las muestras no tratadas y tratadas y luego proponer los modos de reacción más probables entre la mezcla y los minerales del suelo.[30]	Se encontró que el impacto de la adición de LS en el suelo remodelado era mayor para los minerales arcillosos expansivos (montmorillonita) y menor para la arcilla no expansiva minerales (caolinita) y cuarzo relativamente inerte. Estos mecanismos resultaron en una “impermeabilización en la muestra de suelo”.

Nota. Referencias tomadas del análisis de los artículos de investigación seleccionados.

TABLA. 3 UTILIZACIÓN DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS “CBR”

N°	Nombre del artículo	Efecto de las nuevas tecnologías	Mejora en la estabilización "CBR"
[1]	Nanotecnología aplicada a la estabilización de suelos: Factibilidad económica	El Aditivo SoilTek® promueve distintos efectos tales como ligar las partículas del terreno, retener la humedad para reducir la emisión de polvo, regular procesos de adsorción – desorción que provocan la expansividad de los suelos arcillosos	8.60%
[2]	Optimización de Residuos Mineros de Carbón para el Mejoramiento de Suelos Viales con Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo	EL Efecto del uso Algoritmo AEMO es que incrementa los porcentajes de CBR aplicando directamente 4% de cal y 0,02% de cemento, con respecto al uso directo de cenizas volantes que solamente alcanza un 20,53%	56,29%
[3]	Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitoso	El lodo aceitoso genera un efecto positivo en la subrasante, al hacerla menos susceptible a la acción del agua, más impermeable, incrementa su estabilidad hídrica al estar sometida a saturación, lo que garantiza la preservación de las propiedades de resistencia del material en las condiciones más críticas.	40%
[6]	Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio.	El efecto del aditivo hidróxido de calcio con el agua generó el esponjamiento de las mezclas aumentando su volumen y disminuyendo así su densidad seca máxima a medida que aumentaba el porcentaje de aditivo en las mezclas	2% al 92%.
[8]	Effectiveness of waste paper ash for stabilization on clay soil. Revista ingeniería de construcción.	El efecto del aditivo waste paper en el suelo genera que el índice de plasticidad se reduce al aumentar el porcentaje de cenizas de papel usado (Wpa)	5% a 10%.
[11]	Estabilización de un suelo de subrasante de carretera con el sistema Consolid.	El efecto del sistema Consolid hace menos susceptible e impermeable a la acción que genera el agua, dando en sí una seguridad, que aun estando el suelo en condiciones críticas puede mejorar tanto las propiedades como la resistencia de este suelo.	8.3% a 12.4%
[12]	Experimental investigation to study the effect of reinforcement on strength behavior of fly ash.	La adición de Cenizas Volantes examina el efecto del refuerzo circular sobre la resistencia del suelo de la subrasante, mostrando buenas características de resistencia al rodamiento y apoyo, donde la capacidad portante aumenta a medida que aumenta el diámetro de la armadura.	107,71% a 138,31 %
[14]	Uso de Vinaza de Saccharum officinarum para Estabilización de Suelos Cohesivos.	El efecto del aditivo Vinaza de Saccharum officinarum logra incrementar la máxima densidad seca del suelo para la estabilización de la trocha carrozable.	11,8% a 15,8%
[16]	Estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante con adición de bolsas de polietileno fundido.	El efecto del aditivo Polietileno fundido es que a medida que se adiciona el porcentaje del aditivo, el CBR aumenta y, por ende, la resistencia del suelo también aumenta	9,8% a 12,8%
[18]	Stabilization of Colombian lateritic soil with a hydrophobic compound (organosilane).	El efecto del aditivo Hidrofóbico (organosilano) aplicado las muestras de suelo tratadas siempre dieron resultados de CBR más altos, lo que indica que hubo una interacción efectiva entre el suelo y el producto químico agregado, que mantiene sus propiedades sin remojar después de la inmersión en agua.	533%
[20]	Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil.	El aditivo Terrasil tiene un efecto de mayor resistencia a la compresión no confinada, menor valor de permeabilidad, menor asentamiento y altos valores de cbr.	0.03% a 2.5%
[27]	Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión).	Analizaron el efecto del contenido de arcilla en la estabilización del suelo con y sin cenizas de aceite de palma , lo cual dio una excelente durabilidad.	CBR a 22%
[29]	Experimental Study on Stabilization of Black Cotton Soil with Molasses and Arecanut Fibers.	El aditivo de Fibras de nuez de areca , efectúa un aumento en la resistencia del suelo además de la mezcla con Melaza lo cual estos componentes reponen efectivamente en suelos de algodón negro o regur, para lograr un reajuste.	10%
[24]	Effect of Chemical and Biological Stabilization on the Resilient Modulus of Clay Subgrade Soil.	El efecto de los aditivos Nicofok Stabilizer y Beta–glucan Stabilizer en el suelo proporcionan resultados cercanos al modelo de estrés NCHRP, en pérdida de peso de 13.3 a 8 – 6 % reactivamente y aumento de tensión cíclica.	42 % a 101 % y 126%
[13]	Performance of cement-stabilized weak subgrade for highway embankment construction in Southeast Nigeria.	El efecto del aditivo cemento estabilizante mejoró la resistencia al corte de los suelos débiles en Nigeria. Se observó que la resistencia del suelo mejoraba con el aumento del contenido de cemento, esto define una relación lineal existente entre el contenido de cemento y la resistencia de suelo mejorado.	6% a 10 %

Nota. Referencias tomadas del análisis de los artículos de investigación seleccionados.

IV. DISCUSIÓN

La búsqueda llevada a cabo durante el periodo de 2012-2022 implicó la obtención de resultados, los cuales dieron respuesta a nuestra pregunta planteada en el inicio de la presente revisión sistemática, ¿Qué nuevas tecnologías se usan en la estabilización de suelos para carreteras?, puesto que la cantidad de estudios obtenidos brindan información referente sobre la estabilización de un suelo, utilizando diferentes tecnologías, trayendo como consecuencia la mejoría en las características y propiedades del suelo tratado, considerando el impacto ambiental que estas tecnologías pueden generar.

De los 30 artículos de información seleccionados y con respecto a la pregunta planteada se puede afirmar que existe una variedad en estrategias y métodos de aplicación de estas tecnologías hacia el suelo, lo cual se perfilan como unas soluciones para estudiar, pues con estas metodologías se aprovechan las condiciones iniciales de los terrenos procurando elevar la capacidad portante del suelo [4]. Además de establecer un efecto en el desempeño y durabilidad de los suelos viales, considerando los posibles impactos de estas tecnologías sobre el medio ambiente, análisis de ciclo de vida [9], en comparación a materiales tradicionales [7]. De igual manera la dosificación óptima del estabilizador es una tarea difícil de predecir debido a varios factores que afectan el proceso de estabilización [22]. Puesto que en este proceso pueden intervenir muchas variables como el tipo de suelo o material existente, características de la ruta, clima y otros [25].

La revisión de los estudios muestra la aplicación de origen empírica, basándose en trabajos experimentales a fin de determinar espesores óptimos de subrasante para proteger a esta de deformaciones causadas por repetición de cargas [15]. Con estas metodologías se analiza el desempeño del material subrasante frente a cargas de compactación en relación a sus proporciones [10]. Y es importante considerar los volúmenes de suelo al aplicar las distintas técnicas de mejoramiento, porque conociendo dicho factor se puede predecir las deformaciones del mismo y otras características como la expansión, en ese sentido es necesario conocer la grafica adecuada de su comportamiento y para ello se recurre a utilizar metodologías ya existentes [5]

Del mismo modo conocer los índices geotécnicos del suelo como las composiciones, distribuciones granulométricas, es necesario porque las técnicas se enfocan en los cambios de varias propiedades del suelo y como los componentes de las mezclas interaccionan entre varios tipos de minerales [28]. Por la misma caracterización geológica del suelo se puede determinar la densidad del mismo y su resistencia mediante la aplicación de tecnologías estabilizantes, tal es el caso del uso de lignosulfonato, lo cual muestra resultados prometedores para suelos inestables [19]. Bajo estas técnicas se determina la calidad de suelos tratados y si es viable su uso como subrasantes en proyectos viales, además de comprender sus comportamientos en los periodos estacionales, como ser sometidos a periodos de lluvias o diferentes climas [17].

Además, con estas técnicas de aplicación de las nuevas tecnologías estabilizantes se pretende maximizar el desempeño del suelo, lo cual se busca reducción de polvo, conservación de finos y un aporte estructural [25], entre otras características como la impermeabilización en la muestra de un suelo [30]. Finalmente realizando un análisis mas profundo se logra destacar a distintas tecnologías por su incidencia en la mejora del “CBR”, tal es el caso de la nanotecnología aplicada a la estabilización la cual incide en la mejora del cbr en un 8.60% [1], por otro lado, en la aplicación de sistemas, que inciden en una mejora de 12.4% [11], 12.8% [16], mejoras que son redundantes en otras tecnologías como 15.8% [14], 22% [27], 40% [3], 56.29% [7], 92% [6], asimismo con tecnologías de naturaleza biológica que inciden en una mejora de 42% - 101% y 126% respectivamente, todas las tecnologías antes mencionadas inciden en un buen porcentaje de mejora en CBR, pero no tanto como la tecnología de cenizas volantes 138.31% [12] y la nueva tecnología “organosilano” 533% [18], puesto que realizando la comparación de porcentajes de mejora, esta última tecnología tendría la mayor incidencia en la estabilización de suelo.

V. CONCLUSIONES

Después de la recolección de los 31 artículos para el presente trabajo, se realizó un análisis exhaustivo de los mismos, donde se logró conocer los usos de las nuevas tecnologías y sus efectos de estas en la estabilización de suelos para carreteras en el mundo, uso de tecnologías como Soilteck, Terrasil, Consolid, Lodo aceitoso, etc., los cuales resultaron con efectos positivos como la preservación de propiedades de resistencia del material, incremento de estabilidad hídrica, incremento en la mejora del “CBR”, y entre las tecnologías más resaltantes de la presente revisión se tiene, algoritmo AEMO con mejora del cbr en 56.29%, Hidróxido de Calcio con de mejora del cbr en 92%, Nicofok Stabilizer y Beta-glucan con mejora del cbr en 126%, Cenizas Volantes con mejora del cbr en 138.31% y la tecnología de Organosilano Hidrofóbico con índice de mejora del cbr en 533% respectivamente. Cabe resaltar que para realización con éxito del tratamiento con cualquier tecnología estabilizante es necesario conocer al menos el tipo de suelo, y la dosificación pertinente, sin olvidar tales factores como la homogenización del producto en la mezcla suelo agua y la humedad natural del suelo, asimismo evaluar valores de permeabilidad, asentamiento, durabilidad, y por ende la estabilización requerida, lo cual es el objetivo principal de la presente revisión. Por último, se concluye que las nuevas tecnologías pensadas para la estabilización de suelos son positivamente efectivas y, por consiguiente, se recomienda impulsar investigaciones futuras respecto al tema del uso de nuevas tecnologías y su manejo en el medio ambiente, ya que en los últimos años estos materiales vienen siendo un gran aporte en la mejora de diseños de la ingeniería, tanto tecnologías para edificaciones y diseños viales como en este caso.

REFERENCIAS

- [1] Lopez, Gerardo & Ambrosini, Marcela. "Nanotechnology in Soil Stabilization: Economic Feasibility", 2013. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/265642735_Nanotechnology_in_Soil_Stabilization_Economic_Feasibility
- [2] Jiménez, Yolanda A., Bastidas, Marlon J., & Consuegra, José L. "Obtaining of Coal Mining Waste Mixtures for the Soil Stabilization Through Multiobjective Evolutionary Algorithm", 2019. [En línea]. Disponible: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000400249>
- [3] Alarcón, J., Jiménez, M., & Benítez, R. "Stabilization of soils through the use of oily sludge", 2020. [En línea]. Disponible: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000100005>
- [4] Díez, L. & Montes, O. & Caicedo, Bernardo. "Estabilización de Subrasantes con Productos Químicos", 2022. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/238782419_Estabilizacion_de_Subrasantes_con_Productos_Quimicos
- [5] Gonzáles-Rufino, José Luis, & Chávez-Alegría, Omar. "Evaluación de la expansión en suelos presaturados", 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40471804008>
- [6] Cristancho, C. & Sandoval, H. & Naranjo, E. "Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio", 2012. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940771003>
- [7] Restrepo, Gloria, & Ríos, Diana, & Llano, Eliana. "Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad", 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344264140012>
- [8] Putra, Asfino, Herman, Medriosa, & Nugroho, Fajar. "Effectiveness of waste paper ash for stabilization on clay soil", 2022. [En línea]. Disponible: <https://dx.doi.org/10.7764/ric.00030.21>
- [9] Roux, Salvador, & Mujica, José, & García, Manuel. "Los materiales alternativos estabilizados y su impacto ambiental", 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203332667014>
- [10] Sánchez C., E.H, Torres C., GM, y Esquivel R., R.E. "Desempeño de un material granular estabilizado con cemento cuando se aplica carga a compresión", 2019. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.14483/22487638.14640>
- [11] Jácome-Macías, G. A., & Ortiz-Hernández, E. H. "Estabilización de un suelo de subrasante de carretera con el sistema Consolid", 2022. [En línea]. Disponible: <http://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/88/121>
- [12] Ahmad, SA, Ahmad, MS. "Investigación experimental para estudiar el efecto del refuerzo en el comportamiento de resistencia de las cenizas volantes", 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00096-2>
- [13] Ifediniro, C., Ekeocha, N.E. "Performance of cement-stabilized weak subgrade for highway embankment construction in Southeast Nigeria", 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00166-z>
- [14] Bustamante, F., Marín, N., & Benites, J. "Uso de Vinaza de Saccharum Officinarum para Estabilización de Suelos Cohesivos", 2021. [En línea]. Disponible: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S2215-37052022000100046&script=sci_arttext
- [15] Massenlli, Gianina S.R., & Paiva, Cassio E.L. "Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia", 2019. [En línea]. Disponible: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000400613>
- [16] Linares, R., Aguilar, M., & Rojas De La Puente, E. "Estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante con adición de bolsas de polietileno fundido", 2019. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.25127/ucni.v3i2.612>
- [17] Peña S, C., Arévalo V, C., & Ramón A, J. "Análisis de las propiedades físico mecánicas de suelo existentes como subrasante en la ciudad de Cúcuta, municipio de los patios y villa del rosario", 2016. [En línea]. Disponible: https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RA/article/view/3270/1903
- [18] Jerez, D, L. Gómez, E, O. & Murillo, C, A. "Stabilization of Colombian lateritic soil with a hydrophobic compound (organosilane)", 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681417302213>
- [19] Barbieri, D, M. Inge Hoff, & Engeness M, B. "Organosilane and lignosulfonate as innovative stabilization techniques for crushed rocks used in road unbound layers", 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391219302910>
- [20] Karumanchi Meeravali, Nerella Ruben, Kodi Rangaswamy. "Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil", 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320304855>
- [21] Tabora, D. L. V., Vásquez, G. M. R., & Cardona, E. P. L. "Evaluación ambiental del efecto del uso de aditivos químicos en la estabilización de suelos viales", 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.54020/seasv3n2-014>
- [22] O 'Ahmad, Afnan & et al "Physio-Chemical Properties, Consolidation, and Stabilization of Tropical Peat Soil Using Traditional Soil Additives — A State of the Art Literature Review", 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1247-7>
- [23] Lv, Q., Chang, C., Zhao, B. et al. "Loess Soil Stabilization by Means of SiO₂ Nanoparticles", 2018. [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11204-018-9488-2>
- [24] Moradi, G., Shafaghathian, S. & Katebi, H. "Effect of Chemical and Biological Stabilization on the Resilient Modulus of Clay Subgrade Soil", 2022. [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42947-021-00029-x>
- [25] Ulate-Castillo, A. "Estabilización de suelos y materiales granulares en caminos de bajo volumen de tránsito, empleando productos no tradicionales", 2017. [En línea]. Disponible: <https://geoserver.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/908/ESTABILIZACI%C3%93N%20DE%20SUELOS%20Y%20MATERIALES%20GRANULARES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [26] Nurmunira Muhammad, Sumi Siddiqua. "Moisture-dependent resilient modulus of chemically treated subgrade soil", 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795221000399>
- [27] Rivera, J; Guerrero, A; Mejía de Gutiérrez, R; Orobio, Armando. "Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente", 2020. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7590766>
- [28] Cornelia-F, D; Elena-A, C; Valentin-V, U. "Systematic Studies on Defining Interaction Process of Clay Minerals for Achieving Synthetic Mixtures as Composite Materials Applied in Stabilization Works", 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817325237>
- [29] Harsha, S., Raju, K. V. S. B., & Kumar, N. "Experimental study on stabilization of black cotton soil with molasses and arecanut fibers", 2018. [En línea]. Disponible: http://www.ripublication.com/ijaerspl2018/ijaerv13n7spl_45.pdf
- [30] Dennis Pere Alazigha, Buddhima Indraratna, Jayan S. Vinod, Ana Heitor. "Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture", 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391217300314>
- [31] López, C. M. (2013). Publicaciones científicas: El artículo de revisión. Rev. Med. Vet, 94(1), 17–20. https://www.produccion-animal.com.ar/temas_varios_veterinaria/05-la_revision_17.pdf