

EVALUACIÓN DE DOS DIFERENTES ESTABILIZANTES A BASE DE BIOPOLÍMEROS EN PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE SUELO ARCILLOSO

EVALUATION OF TWO DIFFERENT STABILIZERS BASED ON BIOPOLYMERS IN PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF CLAY SOIL.

Loeza-Santiago H. ^{1*}, Gómez- Barranco H. ¹, Chávez- Gutiérrez M. ², López- Calvo H.Z. ¹.

¹Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Facultad de Arquitectura "5 de mayo", Calle 5 de mayo No. 100, Centro, Oaxaca de Juárez, C.P. 68000, Oaxaca, México.

²Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca (CIIDIR), Instituto Politécnico Nacional, Calle Hornos No. 1003, Colonia Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán C.P. 71230, Oaxaca. México.

*hloeza@hotmail.com

RESUMEN

Diversos autores han determinado que existen factores sociales, económicos y climatológicos que afectan la conservación óptima de las terracerías, ocasionando diversas afectaciones en su estructura. Los biopolímeros como agentes estabilizadores representan una alternativa con mayores ventajas constructivas ante estas afecciones, gracias a sus propiedades físicas y químicas.

La presente investigación busco evaluar el efecto de dos diferentes estabilizadores elaborados a base de biopolímeros (Ecosuelo Soil Stabilizer®: BP1 y Suelocreto®: BP2) en las propiedades físicas (prueba de absorción capilar) y

mecánicas (resistencia a la compresión simple y Valor Soporte de California) de un suelo arcilloso de la región de Valles Centrales de Oaxaca, a través de especímenes sometidos a pruebas confinadas de laboratorio. Se empleó un método cuantitativo-descriptivo mediante el cual se observó el desempeño de estos dos estabilizadores en dosificaciones de 0.005%, 0.010%, 0.015% y 0.015%, 0.020%, 0.025% respectivamente, en relación con la humedad óptima del suelo, comparándose con el comportamiento del suelo natural. Los resultados mostraron una disminución de la tasa de absorción capilar del suelo estabilizado con ambos productos, un aumento de hasta un 100 % en los valores de resistencia a la compresión simple con BP1; incremento

del 95% en Valor Soporte de California (CBR) con BP1 en relación con los valores iniciales del suelo natural, permitiendo así aminorar las afectaciones y prolongar la conservación de las capas de terracerías ante el ataque constante de factores naturales y de desgaste, con mayores ventajas desde el punto de vista de impacto ambiental.

Palabras clave: absorción capilar, biopolímeros, estabilizadores, propiedades físico-mecánicas, resistencia.

ABSTRACT

Several authors have determined that there are social, economic and climatological factors that worsen the optimal conservation of dirt roads, causing various effects on its structure. Biopolymers as stabilizing agents represent an alternative with greater constructive advantages in the face of these conditions, thanks to their physical and chemical properties.

The present investigation sought to evaluate the effect of two different stabilizers made from biopolymers (Ecosuelo Soil Stabilizer®: BP1 and Suelocreto®: BP2) on the physical

(capillary absorption test) and mechanical properties (simple compressive strength and California Support Value) from a clay soil in the Valles Centrales region of Oaxaca, through specimens submitted to confined laboratory tests. A quantitative-descriptive method was used by which the performance of these two stabilizers was demonstrated in dosages of 0.005%, 0.010%, 0.015% and 0.015%, 0.020%,0.025% respectively, in relation to the optimum soil moisture, comparing with the behavior of the natural soil. The results showed a decrease in the rate of capillary absorption of the stabilized soil with both products, an increase of up to 100% in the values of resistance to simple compression with BP1; 95% increase in California Support Value (CBR) with BP1 in relation to the initial values of the natural soil, thus allowing to reduce the affectations and prolong the conservation of the layers of dirt roads before the constant attack of natural factors and wear, with major advantages from the point of view of environmental impact.

Keywords: Capillary absorption, biopolymers, stabilizers, physical-mechanical properties, endurance.

INTRODUCCIÓN

El diseño y capacidad de las capas de terracerías se planifica para ofrecer cierta resistencia a elementos y condiciones naturales, que por lo general se exceden y causan daños mayores a los previsibles. Los procedimientos de estabilización de suelos permiten aminorar estas afecciones y tratarlos para optimizar sus cualidades, de manera tal que puedan mejorar sus propiedades físicas y mecánicas para poder soportar las condiciones del medio-ambiente y evitar los problemas que condicionan su durabilidad.

Existen diferentes agentes convencionales que se utilizan para la estabilización de suelos, como es el caso de cal, cemento, productos asfálticos, resinas, polímeros, ácidos y aditivos, entre otros. Robayo , Mulford, Munera, Mejía de Gutiérrez, así como Rivera, Cuarán-Cuarán, Vanegas-Bonil, y otros autores, analizaron y concluyeron que estos estabilizadores tradicionales, suponen una alternativa inmediata para los problemas en las propiedades mecánicas de los materiales, pero poco efectivos si se estudian detenidamente, pues presentan como desventajas, procesos de curado en

plazos amplios que condicionan la apertura o reapertura de los caminos al servicio de los usuarios, así como en el factor económico, pues representan elevados costos en sus procedimientos constructivos al requerirse el uso de grandes cantidades de aditivos o del empleo de acarreo de material, un proceso poco respetuoso con el medioambiente debido a las emisiones de los vehículos que transportan el material y la alteración de los ecosistemas naturales donde se emplazan dichos bancos.

México está conectado por una red de infraestructura terrestre conformada en gran proporción por vías secundarias y alimentadoras que en su mayoría son caminos rurales de tierra [1] que se caracterizan por no contar con una superficie de rodadura óptima, ni sistemas de drenaje, con pendientes irregulares y en constante deterioro [2] por el efecto de las lluvias torrenciales y ácidas, y el tránsito peatonal y vehicular. Es por ello que ha sido necesaria la implementación de estos estabilizadores tradicionales, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos.

En el estado de Oaxaca se han utilizado diferentes procedimientos para la estabilización de suelos, los más

conocidos son las estabilizaciones físicas mediante el reemplazamiento de material de sitio por material de banco, y estabilizaciones químicas con el uso de la cal, el cemento, y los productos asfálticos. Han surgido nuevas opciones de agentes de estabilización, que buscan obtener mayores ventajas constructivas y ambientales, que consisten en la adición de agentes químicos, como es el caso de los estabilizadores elaborados a partir de productos orgánicos. Los estabilizadores elaborados a base de biopolímeros suponen una alternativa sustentable [3][4][5][6], y han sido comercializados en la industria de la construcción con la premisa de que no alteran las propiedades físicas de, brindan aumento de la resistencia mecánica y vida útil, permitiendo que sean más resistente a la erosión, dispersión, colapso y corte.

Estudios realizados en diversos países muestran resultados favorables al adicionar productos a base de polímeros orgánicos para mejorar las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de suelos analizados. Los investigadores han utilizado diferentes metodologías para estudiar y analizar los efectos de los polímeros sintéticos y biopolímeros en el suelo en relación con sus propiedades

físicas y mecánicas, como son pruebas de Límites de consistencia, curvas de compactación, resistencia en compresión simple, compresibilidad, expansión, fotografías de la microestructura y Valor Relativo de Soporte California (CBR).

Este tipo de tecnología se ha empleado en países como Australia, Perú, Colombia, Santiago de Chile, Estados Unidos, donde se ha implementado para la construcción y conservación de caminos, parques y jardines, caminos peatonales y multiuso, taludes, vías verdes, entre otros.

En México, su uso comienza a difundir y se pueden localizar ya algunos distribuidores de estos productos en los estados de Guadalajara, Tijuana y Monterrey, y aplicaciones en los estados mencionados, así como en las ciudades de San Luis Potosí, Querétaro, Chihuahua, Quintana Roo, y Ciudad de México. Sin embargo, esta información en el estado de Oaxaca, en particular, es mínima, derivado de aún no conocerse y aplicarse esta tecnología en el campo de la construcción, incluyendo el área de la infraestructura vial.

Los estabilizadores a base de biopolímero, han aparecido como una alternativa en el área de ingeniería para el

tratamiento de suelos destinados a capas de terracerías, debido al potencial de sus propiedades físicas, como el estado físico y viscosidad; químicas, como la alta solubilidad en agua, capacidad floculante, dispersión y adhesión, y características poliméricas estructurales, que al ser derivados de origen natural responden a la inquietud de retomar aspectos de la problemática ambiental al ser materiales renovables y pueden representar una alternativa más sustentable de construcción.

El objetivo de la investigación fue evaluar la adición de dos diferentes productos estabilizadores elaborados a base de biopolímeros (Ecosuelo Soil Stabilizer® denominado BP1 y Suelocreto® denominado BP2) en la mejora de las propiedades físico-mecánicas de un suelo muestra tipo arcilloso de baja plasticidad, para lo cual se llevaron a cabo ensayos de absorción por capilaridad, resistencia a la compresión simple y Valor Soporte de California a través de especímenes con dimensiones y características de acuerdo a lo solicitado por las normativas aplicables. Los especímenes fueron sometidos a pruebas confinadas de laboratorio con el fin de comparar el desempeño de los estabilizadores BP1 en

dosificaciones de 0.005%, 0.010%, 0.015% y BP2 en dosificaciones de 0.015%, 0.020%, 0.025%, en relación con la humedad óptima del suelo, comparándose con el comportamiento del suelo natural.

Los resultados de las pruebas mostraron un aumento en los valores de la resistencia mecánica del suelo, al crear un efecto conglomerante entre las partículas que lo componen. Se plantea que el uso de estos estabilizadores forman enlaces entre las partículas del suelo incrementando así los índices de resistencia y CBR del material, mejorando los niveles de servicio de las capas de terracerías, aumentando su capacidad de soportar los efectos del tránsito y condiciones de clima severos.

La tasa de absorción determinada en los diferentes especímenes disminuyó también al ser tratados con los agentes estabilizadores. Se observó una relación entre la impermeabilidad y los resultados de resistencia obtenidos en el material en base a las dosificaciones.

METODOLOGÍA.

En el desarrollo de la investigación se utilizó una metodología cuantitativa-

descriptiva, debido a que se recopila información que permitió evaluar las contribuciones de los dos diferentes estabilizadores orgánicos elaborados a base de biopolímeros en el mejoramiento

de las propiedades físico-mecánicas de un suelo, mediante la medición de sus efectos empleando variables cuantitativas por medio de pruebas experimentales

Figura 1.

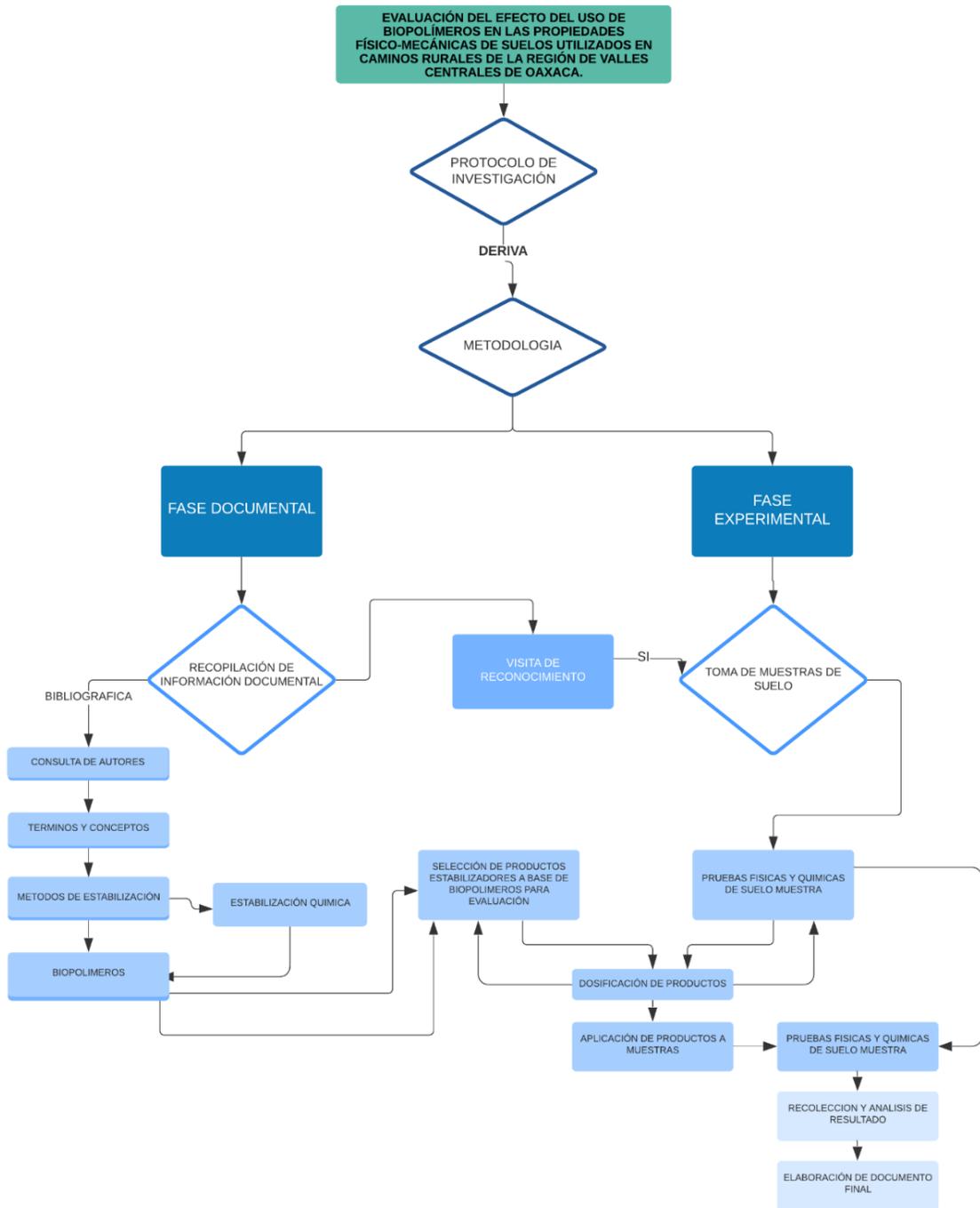


Figura 1.- Metodología de investigación.

La investigación se abordó en dos etapas, (**Figura 1**); en la primera se desarrolla la parte documental, donde se retoma los antecedentes, e información que retroalimenta el marco teórico y estado del arte; la segunda parte, que corresponde a la fase experimental donde se trabajó la caracterización de suelo muestra, obtención de información técnica de los productos estabilizadores que se analizaron, y el desarrollo de cada una de las pruebas de laboratorio propuestas para la evaluación. Se optó por un diseño de experimento comparativo, para analizar y evaluar el efecto de los productos estabilizadores orgánicos en las propiedades físicas y mecánicas y conocer la interacción entre ellos con el suelo, mediante las pruebas de resistencia a la compresión, Valor Relativo de Soporte California, y la Prueba de absorción capilar, en dosificaciones determinadas de en base a las características y especificaciones del suelo en estudio y las recomendaciones de adición dadas por las fichas técnicas de los productos estabilizadores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelo. Para el desarrollo de la etapa experimental, se trabajó con un suelo de la región de los Valles Centrales del estado de Oaxaca; se extrajo la muestra en el predio ubicado en las coordenadas 16° 55' 54.1"N 96° 46' 43.4"W, por medio del método de exploración de pozo a cielo abierto bajo los criterios establecidos en el manual M-MMP-1-01/03 MMP y M-MMP-1-02/03 MMP de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Se realizó la caracterización del suelo identificando sus propiedades físicas, mediante la prueba de granulometría (**Figura 2 y 3**) y límites de Atterberg y se identificó un suelo tipo (CL) de baja plasticidad que se caracteriza por su inestabilidad ante la función de la humedad, lo que modifica su consistencia y resistencia.



Figura 2.- Pesos que pasan la malla número 8.

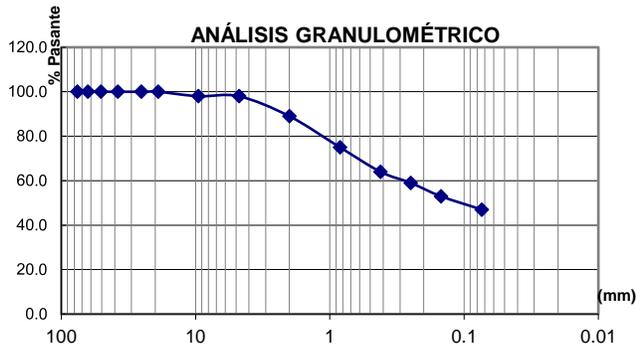


Figura 3.- Gráfica de análisis granulométrico.

Estabilizadores a base de biopolímeros. Una de las técnicas más actuales para la estabilización de suelos es la estabilización química mediante biopolímeros, los cuales son producto de reacciones enzimáticas que permiten reducir la plasticidad y presentar procesos de elaboración más económicos. Al ser producto de origen orgánico llevado a cabo, son susceptibles a la degradación por sistemas biológicos o químicos, siendo perfectamente compostables [7] y no generan efectos negativos en los sistemas biológicos con los que interactúa, presentando compatibilidad con altas concentraciones de sales, capacidad floculante, dispersión y adhesión; proporcionando la estabilización física a través del uso de agentes de unión [8] en el suelo y características poliméricas estructurales, que al ser derivados de origen natural,

permiten ser materiales renovables, que, si bien no dan una solución total a los problemas de estabilización, pueden convertirse en una alternativa más sustentable de construcción.

Los estabilizantes usados para el desarrollo de la investigación son dos productos diferentes de origen orgánico, seleccionados por la disponibilidad más inmediata de los mismos, al ser comercialmente distribuidos en la República Mexicana para la estabilización de suelos al elevar las propiedades mecánicas, incrementar la densidad, mitigar la reabsorción del agua y para el control de polvos volátiles. Otro de los puntos que se consideraron en la selección de los estabilizadores, es que ambos cuentan con la aceptación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Los dos productos estabilizadores se presentan en estado líquido y se muestran algunas propiedades y características para valorar la efectividad de estas en la **Tabla 1.**

El BP1, Eco Green Ecosuelo Soil Stabilizer®, está elaborado a base de ácidos sulfónicos orgánicos extraídos de la savia de árbol y cactáceas, de la marca Ecogreen International Technologies LLC,

empresa internacional con sede en la ciudad de Zapopan, Jalisco, México, utilizado en estabilizaciones de suelos para calles, patios de maniobras y terracerías en los estados de Chihuahua y Guadalajara, México.

Tabla 1.- Características y propiedades generales de productos estabilizadores elaborados a base de biopolímeros informe técnico.

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICA/VALOR	
	BP1 (Suelocreto®)	BP2 (Ecosuelo Soil Stabilizer®)
Estado físico	Líquido	Líquido viscoso
Apariencia-color	Marrón chocolate	Café chocolate marrón
Olor	Azúcares	Leve olor agrio
Punto de ebullición	100°C	100 °C
Punto de congelación	--	-10°C
Punto de inflamabilidad	No flamable	No flamable
Diseño de biopolímero	Orgánico a base caña de azúcar(sacarosa)	Ácidos sulfónicos orgánicos extraído de la sabia de árbol y cactáceas
Solubilidad en agua	99%	100%
PH	6.7	0.09
Densidad	1.10 g/ml	--
Peso por litro	1.065 Kg	1.01 Kg±0.015
Viscosidad	30 CPS	--
Temperatura de trabajo	No aplica	No almacenar debajo de 0°C
Contenido de agua	97%	--
Toxico	No toxico	No toxico
Gravedad específica	1.17	1.00
Dilución	1 Litro x 5m3	10 ml x 1m3

El BP2, Suelocreto® está elaborado a base de caña de azúcar, de la marca Murotec S. de R.L. de C.V., empresa situada en la Ciudad de Tijuana, Baja California, México. Ha sido empleado en proyectos locales, con el objetivo de elevar las propiedades mecánicas del suelo, midiéndolo en pruebas como el Valor Relativo de Soporte California (CBR), triaxial o cortante directo, con la finalidad de cumplir con los requerimientos

de calidad para rellenos; se ha empleado en suelos con diferentes niveles de PH, y se obtuvo que presenta una fuerte actividad tenso-activa y reguladora [9].

Diseño de experimentos. Una vez que se conocieron las características de los estabilizadores a base de biopolímeros, y caracterizado el suelo muestra a emplear, se optó por un diseño de experimento comparativo, para analizar y evaluar el efecto de los productos estabilizadores orgánicos en las propiedades físicas y mecánicas, y conocer la interacción entre ellos con el suelo mediante las pruebas de absorción por capilaridad, resistencia a la compresión en periodos de curado a 7, 14, 28 y 56 días, y Valor Relativo de Soporte California (CBR).

Cabe recalcar, que las dosificaciones de aplicación manejadas se determinaron partiendo de la dosificación señalada y recomendada por la ficha técnica de cada producto estabilizador, establecidas de acuerdo con las características del suelo que se estudia a partir de su clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), obtenida previamente en la etapa de caracterización del material. En ambos casos se trabajaron con intervalos de adición de 0.005%, con un valor de

porcentaje mayor y uno menor, siendo la medida central la dosificación recomendada. Los niveles de dosificaciones que se obtuvieron fueron las siguientes: para BP1 se consideró adicionar en un rango de 0.005 %, 0.010 % y 0.015 % y en el caso del BP2, se manejó porcentajes de 0.015%, 0.020, y 0.025% de producto estabilizador (Tabla 2).

Tabla 2. Diseño de experimentos para la de adición de productos estabilizadores elaborados a base de biopolímeros.

	BIOPOLÍMERO	% DOSIFICACIÓN	RESPUESTA
	CONTROL	--	0.00
SUELO TIPO ARCILLOSO	BP 1	0.005	Tasa de absorción capilar (%)
		0.010	Resistencia a compresión simple (%)
		0.015	Valor relativo de Soporte, curado a 7,14,28 y 56 días (%)
	BP 2	0.015	
		0.020	
		0.025	

La aplicación de los estabilizadores BP1 y BP2, fue mediante disolución en cantidad de agua, considerando los requerimientos de humedad óptima del material para cada prueba elaborada.

Para ello las cantidades de agua que se adicionaron al suelo para la elaboración de cada uno de los especímenes, se calcularon de acuerdo con el porcentaje de humedad óptima máxima obtenida, de la cual se restó la cantidad de agua que

equivaldría el porcentaje de estabilizador que fue adicionado.

Preparación y acondicionamiento de especímenes. En cada una de las pruebas se ensayaron especímenes acondicionados de acuerdo con los requerimientos de la prueba:

- Prueba de absorción por capilaridad: se elaboraron especímenes de dimensiones de 20 cm de altura, por 9.90 cm de diámetro y se curaron en un plazo de 7 días, de acuerdo con las recomendaciones de para normas técnicas y manuales nacionales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM) vigentes, bajo condiciones de confinamiento en laboratorio, con el fin de asegurar el secado uniforme de los especímenes. Posteriormente, se protegieron con una capa plástica en su inferior y lateral, dejando únicamente una cara en contacto con el agua y se colocaron en un recipiente contenedor con una profundidad suficiente para remojo en agua y se realizaron mediciones de la altura del nivel de agua a medida que este asciende, en intervalos de 15 min, 30 min, 1, 2, 3, 4, 8, 24 y 48 horas, conociendo

así, la contención impermeable del material (**Figura 4 y 5**).

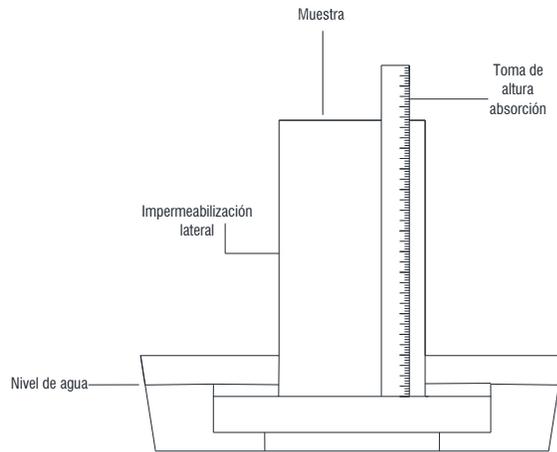


Figura 4.- Esquema del ensayo de absorción capilar. [10].



Figura 5. Sumergimiento de especímenes para prueba de absorción capilar.

- Ensayo de Resistencia a Compresión Simple: se prepararon moldes de 20 cm de altura, por 9.90 cm de

diámetro; la realización de la prueba requirió conservar las condiciones de humedad, por lo que se guardaron en bolsas plásticas, y se colocaron en un recipiente para remojo en agua. Se dejaron en curado en plazos de 7,14,28 y 56 días, y se procedió a realizar la prueba, mediante una prensa hidráulica, en la que se aplicó una carga uniforme hasta que se produjo una deformación (**Figura 6**).



Figura 6.- Especimen en prensa Hidráulica para ensayo a compresión simple.

- Valor Relativo de Soporte California (CBR): se empleó para evaluar la capacidad portante del suelo, para ello se preparan moldes de 15.24 cm de diámetro por 17.78 cm que se sumergieron en agua durante un periodo de 24 horas. Pasado

este tiempo, se sacaron del agua, y procedió a ejecutar la prueba, que consistió en determinar la carga que hay que aplicar a un pistón circular para introducirlo en la muestra de suelo a una velocidad constante hasta obtener una penetración de 2,54 mm de altura mediante la prensa CBR (**Figura 7**).



Figura 7.- Preparación, acondicionamiento de especímenes y ejecución de prueba de valor relativo de soporte.

Prueba de absorción por capilaridad.

La mayoría de los problemas que se enfrentan en la estabilización de suelos, son a consecuencia de las filtraciones del agua, sobre todo en los suelos arcillosos

como el que se analiza, lo que provoca la inestabilidad en los mismos; a causa de la saturación de agua se pierde esfuerzo efectivo entre las partículas del suelo y, por lo tanto, tienden a reducir la resistencia al esfuerzo cortante del mismo. Los resultados obtenidos en esta prueba se presentan en las **Figuras 8, 9 y 10**.

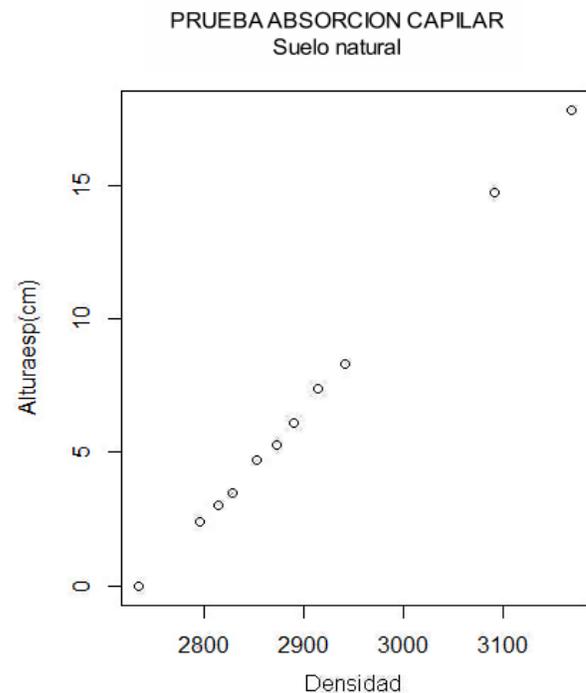


Figura 8.- Absorción capilar del suelo natural

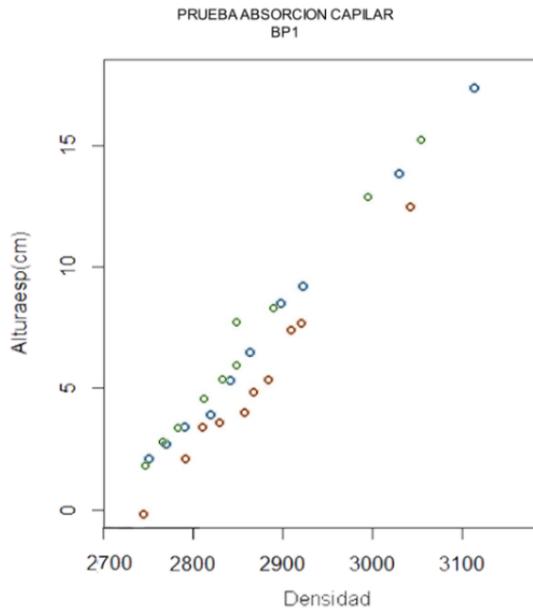


Figura 9.- Absorción capilar del suelo estabilizado con BP1.

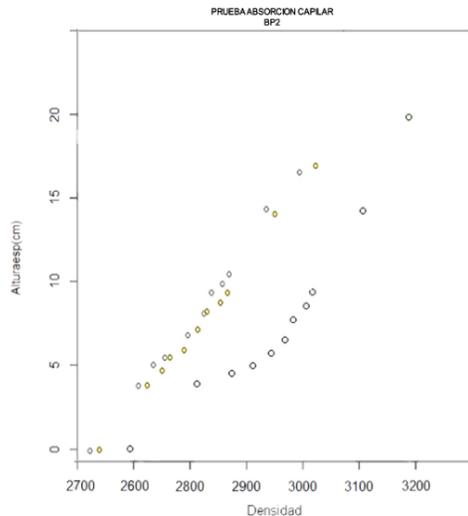


Figura 10.- Absorción capilar del suelo estabilizado con BP2.

Se representó la ganancia en masa por la cantidad de agua absorbida o succión

capilar en el espécimen en relación con el tiempo transcurrido y la altura de ascensión capilar. Se observa que, en relación con la tasa de absorción del suelo natural, esta disminuye en cada uno de los especímenes estabilizados al ser mayor la dosificación empleada; para el caso del BP1 en la dosificación 0.015 % se dio la tasa de absorción más baja, pero sin existir un nivel de significancia alto en relación con el del suelo natural.

Resistencia a la compresión simple.

Lo resultados obtenidos en la prueba de resistencia a compresión arrojan una resistencia del suelo natural sin estabilizador de 2.5877 kg/cm² el cual es una constante, sin afectar los plazos de curado. La aceptación de una capa de terraplén, de acuerdo con las especificaciones y normativa emitida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, deberá cumplir con una resistencia mínima de 5 kg/cm², por lo que el suelo natural que se analiza no cumple como material adecuado para su utilización (**Tabla 3, 4 y 5**).

Tabla 3.- Resistencia a compresión simple del suelo natural.

MUESTRA 1	Nº DE ESPECIMEN	EDAD DIAS	ELEMENTO	DIAMETRO Ø	SECCION CM2	CARGA KG	RESITENCIA KG/CM2
SUELO NATURAL SIN ADITIVO	1	7	ESPECIMENES DE SUELO ARCILLOSO	9.92	77.29	200	2.5877
	2	14		9.92	77.29	200	2.5877
	3	28		9.92	77.29	200	2.5877
	4	56		9.92	77.29	200	2.5877

Tabla 4.- Resistencia a compresión simple del suelo estabilizado con BP1

MUESTRA 2	Nº DE ESPECIMEN	EDAD DIAS	ELEMENTO	DIAMETRO Ø	SECCION CM2	CARGA KG	RESITENCIA KG/CM2
BP1 PROPORCION 0.005	1	7	ESPECIMENES DE SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO	9.92	77.29	250	3.2346
	2	14		9.92	77.29	300	3.8815
	3	28		9.92	77.29	350	4.5284
	4	56		9.92	77.29	350	4.5284
MUESTRA 1	Nº DE ESPECIMEN	EDAD DIAS	ELEMENTO	DIAMETRO Ø	SECCION CM2	CARGA KG	RESITENCIA KG/CM2
BP1 PROPORCION 0.010	1	7	ESPECIMENES DE SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO	9.92	77.29	300	3.8815
	2	14		9.92	77.29	340	4.3990
	3	28		9.92	77.29	350	4.5284
	4	56		9.92	77.29	330	4.2696
MUESTRA 1	Nº DE ESPECIMEN	EDAD DIAS	ELEMENTO	DIAMETRO Ø	SECCION CM2	CARGA KG	RESITENCIA KG/CM2
BP1 PROPORCION 0.015	1	7	ESPECIMENES DE SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO	9.92	77.29	410	5.3047
	2	14		9.92	77.29	440	5.6928
	3	28		9.92	77.29	450	5.8222
	4	56		9.92	77.29	290	3.7521

Tabla 5.- Resistencia a compresión simple del suelo estabilizado con BP2.

ENSAYE	Nº DE ESPECIMEN	EDAD DIAS	ELEMENTO	DIAMETRO Ø	SECCION CM2	CARGA KG	RESITENCIA KG/CM2
BP2 PROPORCION 0.015	1	7	ESPECIMENES DE SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO	9.92	77.29	300	3.8815
	2	14		9.92	77.29	290	3.7521
	3	28		9.92	77.29	300	3.8815
	4	56		9.92	77.29	200	2.5877
ENSAYE	Nº DE ESPECIMEN	EDAD DIAS	ELEMENTO	DIAMETRO Ø	SECCION CM2	CARGA KG	RESITENCIA KG/CM2
BP2 PROPORCION 0.020	1	7	ESPECIMENES DE SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO	9.92	77.29	350	4.5284
	2	14		9.92	77.29	290	3.7521
	3	28		9.92	77.29	270	3.4933
	4	56		9.92	77.29	270	3.4933
ENSAYE	Nº DE MUESTRA	EDAD DIAS	ELEMENTO	DIAMETRO Ø	SECCION CM2	CARGA KG	RESITENCIA KG/CM2
BP2 PROPORCION 0.025	1	7	ESPECIMENES DE SUELO ARCILLOSO	9.92	77.29	370	4.7872
	2	14		9.92	77.29	360	4.6578
	3	28		9.92	77.29	220	2.8464
	4	56		9.92	77.29	200	2.5877

Los especímenes tratados con el estabilizador BP1, presentan un incremento en la resistencia en los tres niveles de dosificaciones empleadas, obteniendo en la dosificación de 0.015 % el incremento que alcanza la resistencia mínima requerida por normativa. Se observa también que, con relación al plazo

de curado, también existe un incremento de resistencia.

En los especímenes estabilizados con el BP2, se observa un incremento de la resistencia en los tres niveles de adición, en comparación con los valores de resistencia obtenidos en los especímenes ensayados con el suelo natural. Sin embargo, ninguno de los niveles alcanza

la resistencia mínima requerida por normativa, misma resistencia, va disminuyendo en los tres niveles de dosificación, al aumentarse el plazo de curado, lo que se da por la pérdida de humedad del material.

Valor Relativo de Soporte California (CBR): En los datos que se obtuvieron se

observa que existe un incremento en el porcentaje de CBR en los tres niveles de dosificación manejados tanto de BP1 como en BP2, y este aumento es relativo a la dosificación de cada producto, existiendo una correlación entre los valores y el aumento de los productos de los especímenes (**Figura 11 y 12**).

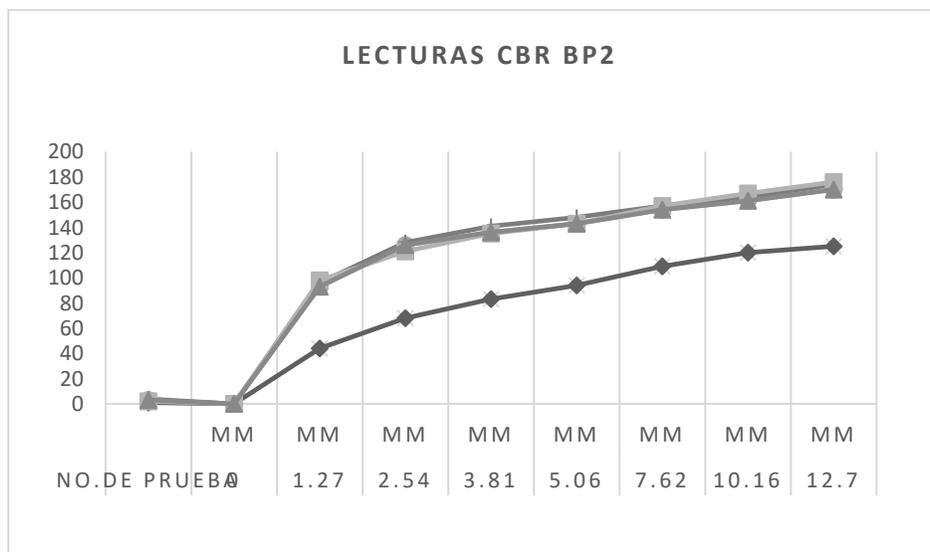


Figura 11.- Lecturas de prueba de CBR obtenidas del suelo estabilizado con BP1

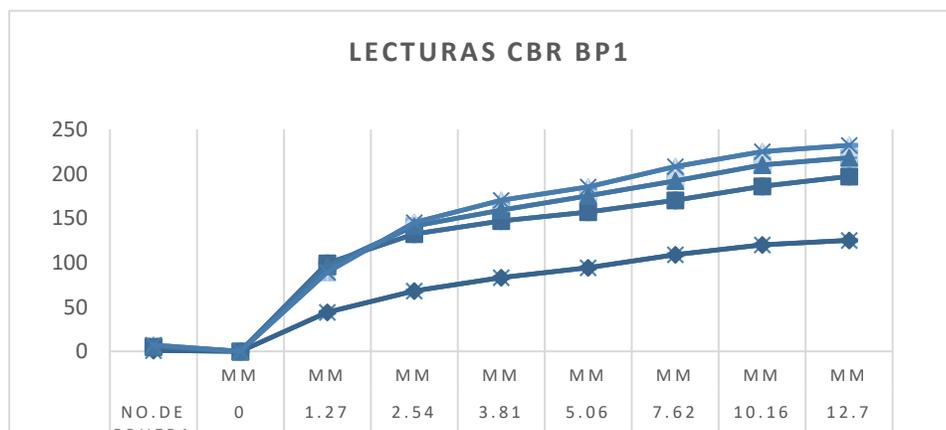


Figura 12.- Lecturas de prueba de CBR obtenidas del suelo estabilizado con BP1

Se comprueba que los estabilizadores BP1 y BP2, elaborados a base de biopolímeros ayudan a elevar el porcentaje de CBR del suelo a un porcentaje aceptable para la normativa aplicable (Figura 13 y 14).

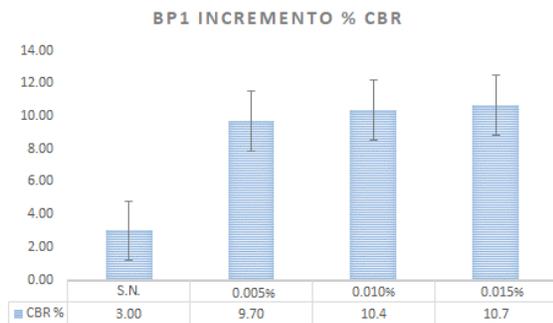


Figura 13.- Porcentajes de incremento CBR obtenidas del suelo estabilizado con BP1 en comparación al porcentaje de CBR del suelo natural.

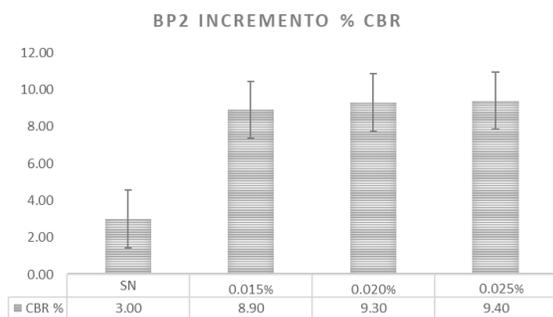


Figura 14.- Porcentajes de incremento CBR obtenidas del suelo estabilizado con BP2 en comparación al porcentaje de CBR del suelo natural.

En los datos que se obtuvieron se observa que existe un incremento en el porcentaje de CBR, existiendo una relación entre los

valores y el aumento de porcentaje utilizado de cada estabilizador.

CONCLUSIONES

Los resultados arrojados en la prueba mecánica de compresión simple, permitieron determinar que se logra alcanzar hasta un 200 % de incremento en los valores de la resistencia del suelo en comparación con la resistencia del suelo natural. Los resultados infieren que la dosificación de 0.015 % del BP1, alcanza el máximo valor en comparación de los resultados arrojados en cada una de las dosificaciones empleadas de los estabilizadores BP1 y BP2, mismo porcentaje que también alcanza la resistencia mínima requerida por normativa aplicable por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes de acuerdo al manual M-MMP-1-01 Muestreo de Materiales para Terracerías, al alcanzar valores superiores a 5.00% en la prueba de resistencia a compresión simple.

Se observa, en la prueba mecánica de CBR, un aumento del porcentaje de resistencia en todas las dosificaciones manejadas de BP1 Y BP2, alcanzando el máximo valor en la dosificación 0.015%

del BP1, en el cual se presenta un incremento de hasta un 300% en relación con los valores de CBR iniciales del suelo sin estabilizar.

Este aumento de la resistencia mecánica del material, una vez aplicado ambos estabilizadores, es debido a que las partículas de suelo se encuentran mejor conglomeradas. Tanto en el caso de los especímenes tratados con BP1, como con el BP2, se genera un efecto aglomerante producido por los estabilizadores a base de biopolímeros, creando una unión entre las partículas que conforman el suelo.

Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas permiten concluir también, que existe una relación entre los resultados de la prueba física de la impermeabilidad y los resultados significativos de aumento de resistencia obtenidos en el material con base a las dosificaciones.

Los estabilizadores elaborados a base de biopolímeros, cumplen con su objetivo principal que es el de aumentar la resistencia mecánica del suelo, por lo que se comprueba su eficacia en la implementación para la estabilización del suelo estudiado, y lo que, se traduce en el incremento de la capacidad de soporte, durabilidad y cohesión del mismo; así

también ayudan a aminorar los problemas de desgaste por erosión en el suelo a causa de las lluvias.

Se concluye así, que los productos estabilizadores influyen positivamente en la capacidad mecánica de los suelos tratados y pueden ser biomateriales idóneos para su implementación en la estabilización de suelos destinados a usarse como capa de terracerías.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento y reconocimiento al laboratorio CYLCAA Construcción & Laboratorio de Control de Calidad por las facilidades para la realización de las pruebas. Se reconoce el apoyo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología mediante la asignación de beca nacional.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, "Red Nacional de Caminos, Documento Técnico Descriptivo", pp. 1-55, 2019.
- [2] Gordon Keller, James Sherar, "Ingeniería de Caminos Rurales. Guía de campo para las mejores prácticas de administración de

caminos Rurales”, Versión en español producida por Instituto Mexicano del Transporte, Órgano Desconcentrado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, septiembre, 2004.

[3] Castañeda, C. G., Riveros, Y. B. Revisión del estado del arte del uso de polímeros en la estabilización de suelos. Colombia, Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2015.

[4] Fata Moradal, M., & A Rehm, B. Bacterial biopolymers: from pathogenesis to advanced materials, 2020. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0313-3>.

[5] Díaz, A., & Mejía V., J. Estabilización de suelos mediante el uso de un aditivo químico a base de compuestos inorgánicos. (I. M. CWL Publishing Enterprises, Ed.), 2004. Obtenido de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/>.

[6] Swain, K. Stabilization of soil using geopolymer and biopolymer. (M. t. Technology. Ed.) Rourkela. 2015.

[7] Ruíz, O., M., Adum R., J., Alcívar, A., Leone, J., P. Los biopolímeros y sus consecuencias: alojenosis iatrogénica. RECIAMUC, 5(1), 180-188. 2021.

[8] Tingle, J. J. Stabilization Mechanisms of Non-Traditional Additives. Transportation Research Board Journal of Transportation Research Board. 2007.

[9] Murotec, S. de R.L. de C.V. Ficha técnica del producto Suelocreto, 2021.

[10] Cirvini, S., Gómez Voltan, J. Test and device to evaluate the capillary absorption in soil specimens of adobe and rammed earth. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, 2014.