

EFFECTO DEL BIOPOLÍMERO GUAR SOBRE EL GRADO DE COMPACTACIÓN EN ARENAS PARA RELLENO ESTRUCTURAL

Effect of guar biopolymer on the degree of compaction in sands for structural filling

Delbert Mamani^a

^a Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de San Martín de Porres, Perú.

RESUMEN – El presente estudio evaluó el efecto del biopolímero guar (GG) en el grado de compactación de arenas bien graduadas utilizadas como relleno estructural. Se emplearon tres porcentajes de adición (1,0 %, 1,5 % y 2,0 %) y tres periodos de reposo (1, 3 y 7 días). Los resultados mostraron que la dosificación óptima fue del 1,0 % con 7 días de reposo, alcanzando una mejora del grado de compactación del 93 % al 97 %, superando los requisitos establecidos por la norma EG-2013. Además, se observó un incremento en la densidad seca máxima y en la densidad in situ. Como aporte ambiental, se realizó una evaluación de la huella de carbono, evidenciando que el uso del biopolímero permitió reducir el uso del equipo de compactación, disminuyendo las emisiones asociadas y reafirmando el carácter sostenible del aditivo. En consecuencia, el biopolímero guar se presenta como una alternativa eficiente, técnica y ambientalmente viable para la ingeniería geotécnica.

ABSTRACT – This study evaluated the effect of guar biopolymer (GG) on the degree of compaction of well-graded sands used as structural fill. Three addition percentages (10%, 1.5%, and 2.0%) and three resting periods (1, 3, and 7 days) were used. The results showed that the optimal dosage was 1.0% with a 7-day rest period, achieving an improvement in the degree of compaction from 93% to 97%, exceeding the requirements established by the EG-2013 standard. In addition, an increase in maximum dry density and in-situ density was observed. As an environmental contribution, a carbon footprint assessment was carried out, showing that the use of the biopolymer reduced the use of compaction equipment, decreasing associated emissions and reaffirming the sustainable nature of the additive. Overall, guar biopolymer is presented as an efficient, technically and environmentally viable alternative for geotechnical engineering.

Palabras Clave – grado de compactación, biopolímero guar, relleno estructural.

Keywords – degree of compaction, guar biopolymer, structural fill.

1 – INTRODUCCIÓN

El material utilizado para relleno estructural (tuberías metálicas corrugadas, muros de contención, redes públicas; instalación de agua y desagüe, etc) y es aplicado en procesos constructivos de compactación de capas estructurales, en muchas ocasiones presentan problemas para lograr una óptima compactación, debido a que la cantera donde se extrae el material podría cumplir con el mínimo de las condiciones requeridas para su explotación o contener limo en

E-mails: delbert_mamani@usmp.pe

ORCID: [orcid.org/ 0009-0007-8908-3365](https://orcid.org/0009-0007-8908-3365)

cantidades que puedan perjudicar las propiedades mecánicas del suelo. En ese mismo sentido, el impacto ambiental negativo que ocasiona el apisonador compactador, por el tipo de combustible que consume (gasolina), para realizar el proceso constructivo, es una preocupación latente.

La correcta elección de agregados granulares resulta fundamental en cimentaciones y estructuras de tierra, pues influye de manera directa en su estabilidad, capacidad de carga y comportamiento a lo largo del tiempo. La mezcla de arena y grava se ha identificado como la más adecuada, al permitir una compactación más uniforme y eficiente, aumentar la resistencia al corte y mejorar el soporte del terreno (Verbal, 2020). Al respecto, la normativa del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú (MTC, 2013) considera dentro de sus especificaciones técnicas generales para la construcción que el material que se debe utilizar para realizar el relleno estructural debe aquel que tenga un diámetro menor a dos pulgadas, un índice de plasticidad menor a 11%, que serán compactadas al 95% de la máxima densidad seca del Proctor modificado, en capas de 15 a 20 centímetros cada una y pasando 3 controles de calidad por cada capa compactada (MTC, 2013). Sin embargo, y a pesar de tener todas esas consideraciones, al realizar los controles de calidad, no se logra alcanzar al grado mínimo de compactación del 95% establecido en la normativa (llegando solo al 92% o 93% del grado compactación), siendo importante mencionar que el vacío radial que genera la tubería metálica corrugada produce que el material (relleno estructural) tiene un comportamiento atípico, en base a ello, se realizará el presente estudio. El principal objetivo es investigar el efecto del biopolímero guar (en adelante GG), sobre el grado de compactación y huella de carbono de arenas bien graduadas para aplicaciones de relleno estructural, apoyados en los objetivos específicos siguientes: analizar; los límites de consistencia, Proctor modificado, prueba densidad cono de arena in situ, determinar el grado de compactación y prueba de huella de carbono.

La estabilización de suelos mediante aditivos tradicionales como cemento Portland y cal ha sido la norma en grandes proyectos de infraestructura. Sin embargo, estos materiales conllevan una elevada huella de carbono y costos económicos elevados, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y eficientes. En este contexto, los biopolímeros han emergido como promesa para la ingeniería geotécnica moderna, al combinar un bajo impacto ambiental con prestaciones mecánicas competitivas (Shrivastava et al., 2024).

Entre los biopolímeros más estudiados, la goma guar ha mostrado resultados sobresalientes. Ensayos recientes indican que una dosis del 5 % de guar, con un curado de 28 días, puede elevar la resistencia al corte hasta 1 709 kPa y reducir en una unidad el cociente de presión de poro, mitigando así el riesgo de licuefacción (Shrivastava et al., 2024).

No obstante, para garantizar su adopción a gran escala, es esencial evaluar la durabilidad de estos tratamientos ante ciclos repetidos de humectación y secado. Soldo y Miletic (2022) documentaron que ciertas mezclas con biopolímero preservaron más del 70 % de la masa inicial tras múltiples ciclos, mientras que otras conservaron hasta el 45 % de su resistencia original. Estos resultados subrayan la importancia de ajustar la formulación y las condiciones de curado para maximizar el desempeño a largo plazo.

La aplicación de guar al 1 % en suelos arcillosos ha demostrado mejoras sustanciales en parámetros clave: reducción de la plasticidad, aumento de la resistencia no drenada y mejor grado de compactación, sin perjudicar el equilibrio ambiental (Bagriacik y Kahiyah, 2021). En paralelo, Ramani et al. (2020) evidenciaron que, al interactuar con partículas finas, la goma guar forma redes cohesivas que aumentan la rigidez y la tenacidad del suelo, posicionándola como una alternativa viable a los métodos convencionales.

Por otra parte, Cheng y Gengy (2021) detallan cómo, en suelos altamente saturados, la baja viscosidad inicial del hidrogel de guar se compensa tras un proceso controlado de deshidratación, cuando las biopelículas resultantes refuerzan la estructura del suelo. Similarmente, Kumar y Ramani (2021) resaltan que los biopolímeros inducen enlaces iónicos e interacciones por puente de hidrógeno.

Recientemente, también han surgido avances en la estabilización sostenible de subrasantes polimerizadas sometidas a carga cíclica y a la activación nanométrica de sus aglutinantes.

Ikechukwu (2023) documentó en Singapur mejoras en la resistencia y restricción de grietas en subrasantes tratadas con biopolímeros bajo carga cíclica, mientras que Aneke y Hassan (2023) demostraron un rendimiento resiliente cuando se emplearon cenizas volantes de tamaño nanométrico. En entornos de laboratorio, Ikechukwu y Chibuzor (2022) reportaron un aumento del módulo resiliente y control de grietas en subrasantes expansivas precargadas con aglutinantes nanogeopoliméricos, hallazgo que concuerda con los resultados de Onyelowe et al. (2022), quienes destacaron la eficacia del polvo de cantera geopolimérico. Además et al. (2024) investigaron la durabilidad de suelos tratados con el biopolímero de xantano en conjunto con fibras de sisal. También, Aneke et al. (2024) evidenciaron la mejora de la resistencia dinámica al corte y la reducción de microhuecos en suelos expansivos tratados con cenizas volantes nanodesilicatadas. Estos estudios subrayan el potencial sinérgico de los biopolímeros y los aglutinantes nanométricos para incrementar la resiliencia y durabilidad de las subrasantes en proyectos de infraestructura.

Finalmente, la incorporación de biopolímeros como la goma guar en suelos de baja resistencia y alta compresibilidad - frecuentes en zonas periurbanas de rápido crecimiento - no solo mejora la capacidad portante y la durabilidad frente a cambios de humedad, sino que también aprovecha subproductos industriales de bajo costo, alineándose con los objetivos de economía circular (Villalta y Chang, 2020). En conjunto, estos avances refuerzan la pertinencia del GG como estabilizante sostenible en proyectos de relleno y subrasantes estructurales, abriendo nuevas líneas de investigación para optimizar su formulación y garantizar su desempeño en condiciones reales.

A partir de lo mencionado, se cuenta con precedentes sólidos que ratifican que el uso del GG es una técnica innovadora y prometedora para darle mayor estabilidad al suelo, mejorar su capacidad de soporte, incrementar la resistencia y amigable con el medio ambiente que brinda nuevas metodologías para su uso en la ingeniería civil.

Para este estudio, se analizó el suelo en su estado natural (SN) y se preparó tres dosificaciones adicionales del 1,0%, 1,5% y 2,0% con el GG, respetando los días de periodo de reposo (DPR). A continuación, se realizaron los ensayos de laboratorio como la prueba de granulometría por tamizado, límites de consistencia, compactación de suelos con una energía modificada, adicional a estas, se realizaron ensayos in situ como la prueba de control Speedy, densidad cono de arena; para determinar el grado de compactación de rellenos estructurales y prueba de huella de carbono (para determinar la cantidad de CO₂, expresada en kilogramos, del equipo en el proceso de compactación por capa). Se investigó el efecto que tiene el GG en todos los ensayos anteriormente mencionados con sus respectivos porcentajes de adición y, en consecuencia, el suelo modificado, tendrá un impacto positivo en las propiedades mecánicas y cualidades geotécnicas realizadas.

2 – MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 – Suelo en estado natural

El material utilizado para el presente estudio proviene de la cantera nueva esperanza, que pertenece al distrito de Chamaca, dentro de región del Cusco, Perú. Las cualidades y propiedades para su uso geotécnico fueron desarrolladas a través de ensayos de laboratorio y como resultado de las diferentes pruebas se presenta lo siguiente. El ensayo granulométrico determinó que la muestra ensayada dio como resultado una arena bien gradada (SW), según la norma ASTM D422, y como se muestra en la Figura 1a. En concordancia con su clasificación como arena bien graduada (SW), el suelo fue caracterizado como no plástico (NP) según la norma ASTM D4318, ya que este tipo de materiales granulares no presenta estados de consistencia plástica.

El resultado de la prueba de compactación con máxima densidad seca de 2271 kg/m³ y 7,24% de humedad óptima según la norma ASTM D1557, como indica la Figura 1b. Finalmente se realizó la prueba in situ densidad cono de arena y prueba de control Speedy, encontrando el valor de la densidad en campo de 2101 kg/m³ y 7,11% de humedad, según las normas ASTM D1556 y

ASTM D4944 respectivamente, todos los ensayos descritos con anterioridad corresponden al suelo sin adición (suelo natural).

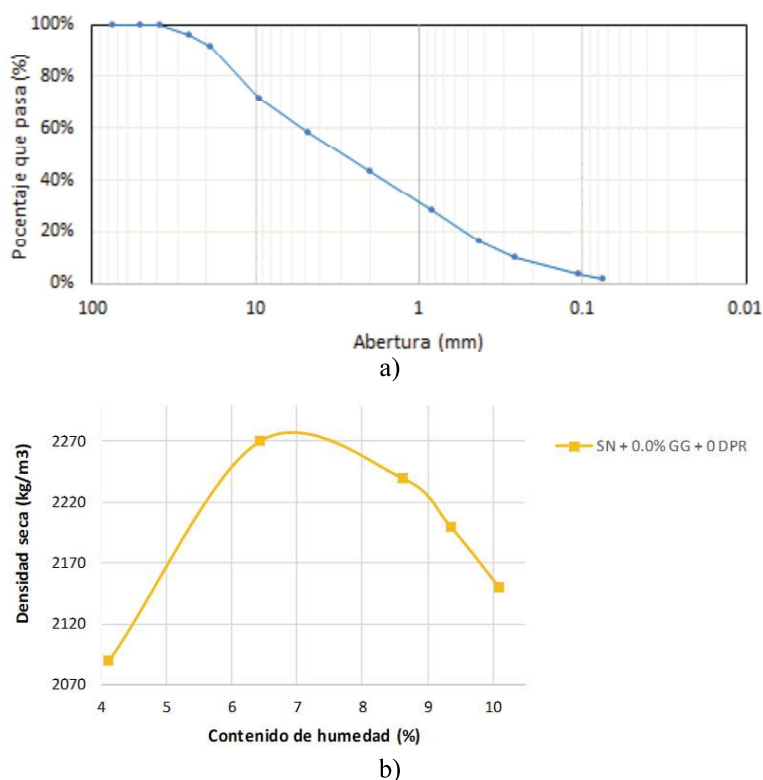


Fig. 1 – Ensayos realizados: a) Curva granulométrica del suelo en su estado natural; b) Curva de compactación del suelo natural.

2.2 – Biopolímero guar

El GG es un glúcido complejo carbohidrato de origen vegetal que tiene un vínculo con las leguminosas, con nombre científico *Cyamopsis tetragonolobus* y de composición química definida $C_6H_{12}O_6$. La principal propiedad y característica es que presenta una viscosidad de dispersiones dependiendo de la temperatura, tiempo y concentración. Es económico, su producción no confiere dificultad y está disponible por industrias químicas (Kahiyah, 2020). El GG que se utilizó para el presente estudio, corresponde a la empresa química Amtex Colombia.

2.3 – Preparación de las muestras

En esta investigación, el GG se mezcló con el suelo en tres dosificaciones distintas 1,0%, 1,5% y 2,0, que van con relación al peso seco de la muestra a ensayar, haciendo uso del método de preparación mecánica manual hasta obtener una apariencia homogénea y una cantidad de agua específica que se requiere para cada tipo de prueba, tal como se muestra en la Figura 2. Para las pruebas de compactación, cada espécimen fue aislado en un ambiente hermético para que no pueda verse afectado por la oxidación y la pérdida de su contenido de humedad (Sujatha y Saisree, 2019), requerido en la norma ASTM D1557 para generar una curva de compactación, los especímenes

tuvieron un tiempo de período de reposo de 1 día, 3 días y 7 días, para que puedan completar su proceso de hidratación a corto plazo en la formación de hidrogeles. Además, para realizar la prueba de densidad in situ mediante el cono de arena, se tomó como referencia el espécimen con 7 días de período de reposo, debido a que en ese periodo presenta las mejores cualidades mecánicas de la máxima densidad seca y contenido de humedad óptimo (Retuerto y Gonzales, 2022).



Fig. 2 – a) Dosificación del GG proporcional al peso de la muestra a ser ensayada; b) Proceso incorporación del GG y posterior mezclado con la muestra de suelo, mediante el batido manual en seco.

Para las pruebas de compactación de suelos, las muestras se colocaron y se apisonaron en el molde de 152,4 mm de diámetro y un martillo de 44,5 N el mismo que cae a una altura de 457 mm, generando una energía de compactación de 2,700 kN-m/m³, según la norma ASTM D1557 y la Figura 3.



Fig. 3 – Superficie enrasada y escarificada, retirando el material excedente del molde, para obtener una lectura precisa del espécimen compactado.

2.4 – Procedimiento de los ensayos

Se inició con la determinación de los límites de consistencia, seguida de las pruebas de compactación con energía modificada; para ello, las muestras se mezclaron en sus diferentes dosificaciones con GG, respetando los días de periodo de reposo. Posteriormente, se efectuaron los ensayos de campo para determinar la humedad mediante el método Speedy y la densidad a través del cono de arena. Finalmente, se calculó la huella de carbono empleando la metodología propuesta por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2006).

3 – RESULTADOS

3.1 – Límites de consistencia

Se realizaron las pruebas para determinar los límites de consistencia del suelo en su estado natural y modificado con GG tal como se muestra en la Tabla 1. El GG causa un proceso de hidratación en contacto con el agua, generando una interacción entre las partículas del biopolímero y agua, obteniéndose como resultado un gel viscoso, tal como se muestra en la Figura 4a. La cantidad de agua presente en los especímenes es la necesaria para lograr la saturación de la mezcla y obtener una pasta homogénea, como se muestra en la Figura 4c. Este comportamiento de gel viscoso sería debido a las propiedades naturales del biopolímero al presentar una viscosidad entre 5000 a 6000 cps, presentando una considerable resistencia al flujo y le brindaría una consistencia pegajosa y espesa, según su ficha técnica. Además, al utilizar las proporciones de la mezcla de GG, agua y suelo, el índice de plasticidad incrementa debido a que el GG es altamente absorbente de agua, a medida que se incrementa las adiciones, esta variación podría deberse a esta propiedad natural. Además, cuando sobrepasa los límites de dosificación sugerido, esta mezcla homogénea, no presenta trabajabilidad.

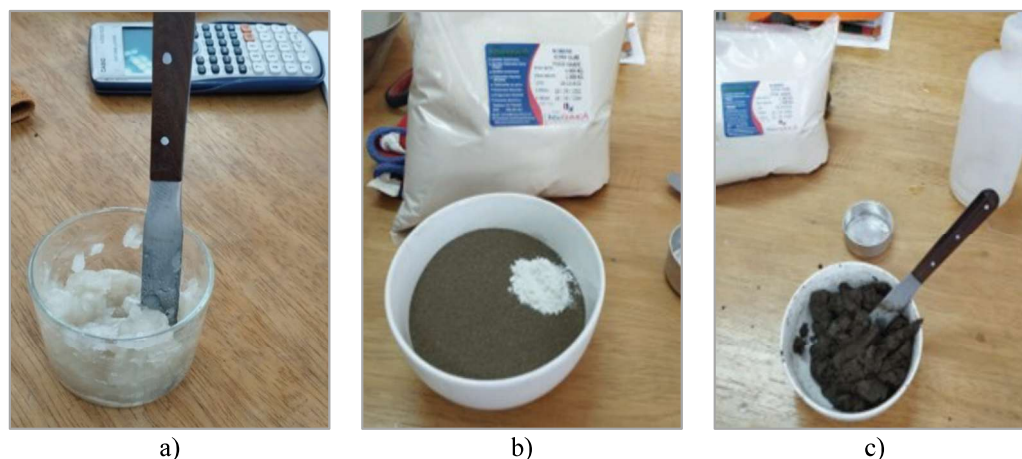


Fig. 4 – a) Proceso de hidratación de la GG con el agua; b) dosificación de los 150 gramos para el LL al 1,0% de adición de la GG; c) mezcla del espécimen con agua destilada o desmineralizada.

Tabla 1 – Resumen de los resultados obtenidos de todos los especímenes ensayados con sus distintas modificaciones.

Descripción	LL (%)	LP (%)	IP (%)
SN	NP	NP	NP
SN + 1,0% GG	28,34	15,86	12,48
SN + 1,5% GG	34,79	18,73	16,06
SN + 2,0% GG	41,85	22,59	19,26

3.2 – Pruebas de compactación

Se determinó las curvas de compactación del suelo natural y del suelo modificado con la GG, con sus respectivos días de periodo de reposo (DPR) a corto plazo detallados previamente en la sección 2.3, como se muestra en la Figura 5.

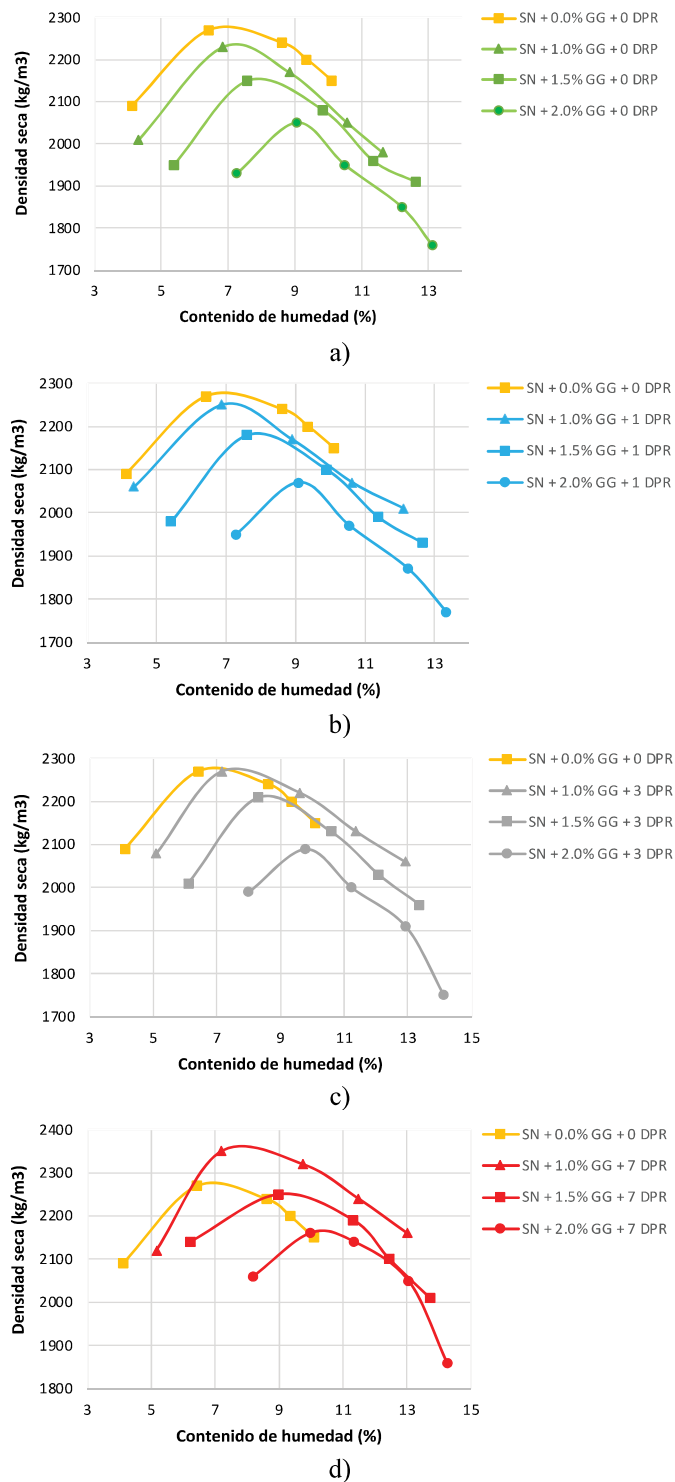


Fig. 5 – Superposición de curvas de compactación con modificaciones del GG para diferentes tiempos de reposo: a) 0 DRP (compactación inmediata); b) 1 DRP; c) 3 DRP; y d) 7 DRP.

Se presenta un resumen tabular de los datos obtenidos de la máxima densidad seca y contenido óptimo de humedad de la totalidad de los ensayos realizar mediante el Proctor modificado, como indica la Tabla 2.

Tabla 2 – Resumen tabular de la matriz experimental de las curvas de compactación, respecto a su contenido de humedad óptima.

Descripción	Dosificaciones/Periodo de reposo	Densidad seca máxima (kg/m ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
Compactación sin reposo (0 DRP)	SN + 0,0% GG + 0 DPR	2271	6,92
	SN + 1,0% GG + 0 DRP	2234	7,21
	SN + 1,5% GG + 0 DRP	2156	7,95
	SN + 2,0% GG + 0 DRP	2052	9,16
Compactación con un día de reposo (1 DRP)	SN + 1,0% GG + 1 DRP	2254	7,25
	SN + 1,5% GG + 1 DRP	2182	8,01
	SN + 2,0% GG + 1 DRP	2071	9,18
Compactación con tres días de reposo (3 DRP)	SN + 1,0% GG + 3 DRP	2272	7,32
	SN + 1,5% GG + 3 DRP	2213	8,32
	SN + 2,0% GG + 3 DRP	2091	9,89
Compactación con siete días de reposo (7 DRP)	SN + 1,0% GG + 7 DRP	2356	7,56
	SN + 1,5% GG + 7 DRP	2252	9,23
	SN + 2,0% GG + 7 DRP	2163	10,36

Se presenta un resumen gráfico de las máximas densidades secas del suelo natural y del suelo con sus respectivas adiciones del GG, así como también, el contenido óptimo de humedad de todos los suelos tratados, como se muestra en la Figura 6.

Como se observa en la Tabla 2 y Figura 6, el suelo natural presenta una densidad seca máxima (DSM) de 2271 kg/m³ y una humedad óptima (HO) de 6,92%. Inicialmente, sin período de reposo (0 DRP), la adición de GG provoca una caída en la DSM y un aumento en HO debido a una hidratación incompleta del biopolímero. No obstante, al incrementar el tiempo de reposo (1, 3 y 7 DRP), se registra una tendencia positiva de recuperación y aumento de la DSM en todas las dosificaciones, alcanzando valores de hasta 2356 kg/cm³ para el 1,0% de GG a los 7 días. Este comportamiento, se atribuye a la maduración del proceso de hidratación y la formación gradual de una matriz de gel viscosa que rellena los espacios vacíos y mejora la respuesta del material durante la compactación, demostrando además la alta capacidad de absorción de agua del biopolímero a mayores dosis.

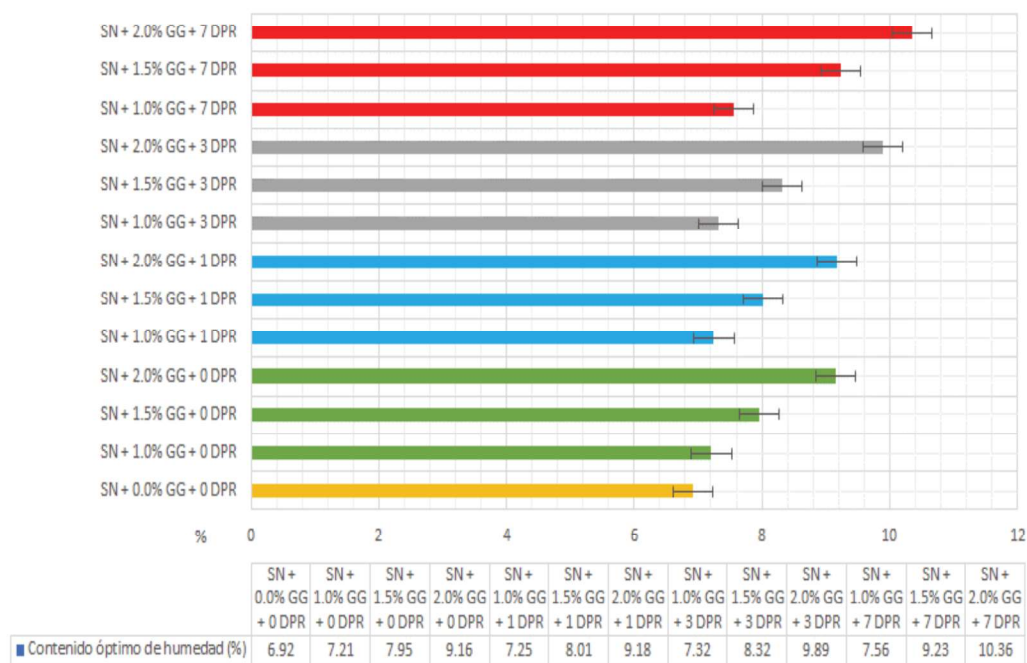
3.3 – Densidad cono de arena

Detalle de datos generales para las pruebas in situ de las capas compactadas tanto del suelo en su estado natural como de las adiciones con el GG, y tomando la dosificación óptima de 1,0% con siete días de período de reposo (7 DPR), como se indica en la Tabla 3.

Se detalla la descripción completa de los parámetros necesarios para la determinación de la densidad de suelo seco o densidad in situ, mediante el uso del cono de arena la muestra natural y sus respectivas adiciones con el GG, tal como indica la Tabla 4.



a)



b)

Fig. 6 – a) Variación de la máxima densidad seca del suelo natural, sus modificaciones con GG y periodos de tiempo de reposo, obtenidas en el laboratorio mediante el ensayo del Proctor modificado; **b)** Variación del contenido óptimo de humedad de todos los especímenes ensayados con GG y su tiempo de período de reposo.

Tabla 3 – Breve descripción de los datos generales donde se realizó las pruebas in situ con las adiciones del GG con 7 días de periodo de reposo.

Cantidad	Nº01	Nº02	Nº03	Nº04
Descripción del suelo	SN+0,0%GG+ 0 DPR	SN+1,0%GG+ 7 DPR	SN+1,5%GG+ 7 DPR	SN+2,0%GG+ 7 DPR
Descripción	ÚLTIMA CAPA	ÚLTIMA CAPA	ÚLTIMA CAPA	ÚLTIMA CAPA
Lado	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO
Fecha de Muestreo	NOVIEMBRE	NOVIEMBRE	NOVIEMBRE	NOVIEMBRE
Espesor de capa controlada	0,15 m	0,15 m	0,15 m	0,15 m
Espesor de capa compactada	0,20 m	0,20 m	0,20 m	0,20 m

Tabla 4 – Se presenta los parámetros extraídos en obra, mediante la prueba del cono de arena para determinar la densidad seca in situ, del suelo natural y sus respectivas adiciones.

Descripción	Unidad	Nº01 SN+0,0%GG+ 0 DPR (Suelo sin tratar)	Nº02 SN+1,0%GG+ 7 DPR	Nº03 SN+1,5%GG + 7 DPR	Nº04 SN+2,0%GG+ 7 DPR
Contenido de humedad (Speedy)	%	7,11	7,51	9,15	10,25
Densidad suelo seco	kg/m ³	2101	2280	2106	1990

Los resultados que se reportaron en la Tabla 4, para las pruebas in situ, mediante el uso del cono de arena, se detallan a continuación: Suelo natural (SN+0,0%GG+ 0 DPR) presenta una densidad de 2101 kg/m³, SN+1,0%GG+ 7 DPR tiene una densidad de 2280 kg/m³, SN+1,5%GG+ 7 DPR con una densidad de 2106 kg/m³ y SN+2,0%GG+ 7 DPR con una densidad de 1990 kg/m³, todas las densidades detalladas anteriormente, son pruebas de campo o in situ, respetando el tiempo de periodo de reposo para realizar la compactación.

Para la determinación del peso específico de la grava, mediante ensayos de laboratorio, se utilizó la norma ASTM C127 15, obteniéndose un valor final de 2530 kg/m³.

3.4 – Interacción entre las partículas de suelo y biopolímero guar

También realizaron un estudio en el microscopio electrónico de barrido de un suelo tratado con la goma guar al 2%, y señala que en el suelo tratado con esta goma se reducen los espacios vacíos, comparados con el suelo natural (Ramani et al., 2020), tal como se muestra en la Figura 7. En dicha imagen, se puede apreciar que la adición del biopolímero actúa como un agente cementante que recubre las partículas de suelo, rellenando los poros intergranulares y creando una estructura más densa y continua en comparación con la porosidad abierta del suelo sin tratar.

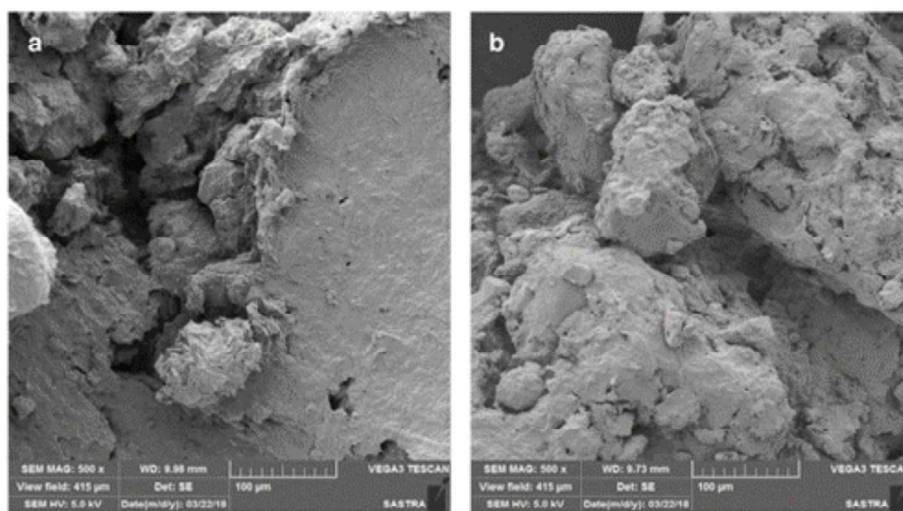


Fig. 7 – a) Se muestra el suelo natural; b) El suelo tratado con el GG, donde, se observa un relleno de los espacios vacíos con el biopolímero (Ramani et al., 2020).

3.5 – Interacción entre las partículas de suelo y biopolímero guar

Finalmente, para determinar el grado de compactación se necesitará los datos de la máxima densidad seca en laboratorio en relación directa con la densidad in situ del cono de arena tal como lo indica la Tabla 5, utilizando la norma ASTM D1556, y como lo indica la siguiente Ecuación 1:

$$G.C. (\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_{max}} \times 100 \quad (1)$$

Donde G.C. es el grado de compactación, γ_d es la densidad seca en campo y γ_{max} es la máxima densidad seca en laboratorio obtenida del ensayo del Proctor modificado.

Tabla 5 – Resumen de los resultados obtenidos de todas las pruebas ensayadas in situ con sus distintas adiciones del GG con 7 días de periodo de reposo.

Correlación de datos de la densidad en laboratorio y densidad in situ	Unidad	SN+0,0 %GG+ 0 DPR	SN+1,0 %GG+ 7 DPR	SN+1,5 %GG+ 7 DPR	SN+2,0 %GG+ 7 DPR
Máxima densidad seca laboratorio	kg/m ³	2271	2356	2252	2163
Densidad in situ	kg/m ³	2101	2280	2106	1990
Grado de compactación	%	93	97	94	92

En consecuencia, según el reporte de datos, se puede mencionar que el grado de compactación del suelo natural es del 93% y trabajando con la proporción óptima del 1,0% GG + 7 DPR, se obtiene un 97% grado de compactación, logrando superar y garantizar con éxito, los parámetros mínimos exigidos en la norma del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2013), en rellenos estructurales.

4 – PRUEBA DE HUELLA DE CARBONO

En la presente investigación, la determinación de la huella de carbono se llevó a cabo mediante la recopilación sistemática de datos operativos de un compactador Wacker Neuson BS50-4As. Para ello, se realizaron múltiples ensayos (20 pruebas) bajo condiciones controladas, el tiempo de compactación por cada ensayo, el consumo de gasolina en litros, el factor de emisión $-2,3 \text{ kg}$ de CO_2 para la gasolina (Natural Resources Canada, 2014), y las consecuentes emisiones de dióxido de carbono expresadas en kilogramos. El estudio comparó dos configuraciones distintas, denominadas SN y SN+1,0%GG+7DPR, con el objetivo de evaluar las variaciones en el impacto ambiental y determinar la efectividad de las modificaciones implementadas en la reducción de emisiones, utilizando la Ecuación 2, propuesta por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio Climático (2006):

$$\text{Huella de CO}_2 = \text{Dato de actividad} \times \text{Factor de emisión} \quad (2)$$

Para los escenarios SN y SN+1,0%GG+7DPR, se registran 20 pruebas de cada una, con tiempos de compactación que varían entre 20 y 25 minutos para SN y entre 18 y 21 minutos para SN+1,0%GG+7DPR. El consumo de gasolina por prueba oscila entre 0,367 L y 0,458 L para SN, y entre 0,300 L y 0,385 L para SN+1,0%GG+7DPR, indicando un consumo aparentemente menor en esta última prueba. De manera similar, las emisiones de CO_2 por prueba muestran un rango de 0,843 kg a 1,054 kg para SN, y de 0,759 kg a 0,886 kg para SN+1,0%GG+7DPR, sugiriendo una reducción de emisiones en la propuesta SN+1,0%GG+7DPR.

La Figura 8 de dispersión de datos, titulada "Prueba de huella de carbono CO_2 : SN vs SN+1,0%GG+7DPR", ilustra las emisiones de CO_2 por número de prueba para ambos escenarios. Se observa claramente que los puntos correspondientes al escenario SN+1,0%GG+7DPR (dispersión de puntos amarillos) se sitúan consistentemente por debajo de los puntos del escenario SN (dispersión de puntos rojos). Esto valida visualmente que el escenario SN+1,0%GG+7DPR logra menores emisiones de CO_2 en la mayoría de las pruebas individuales.

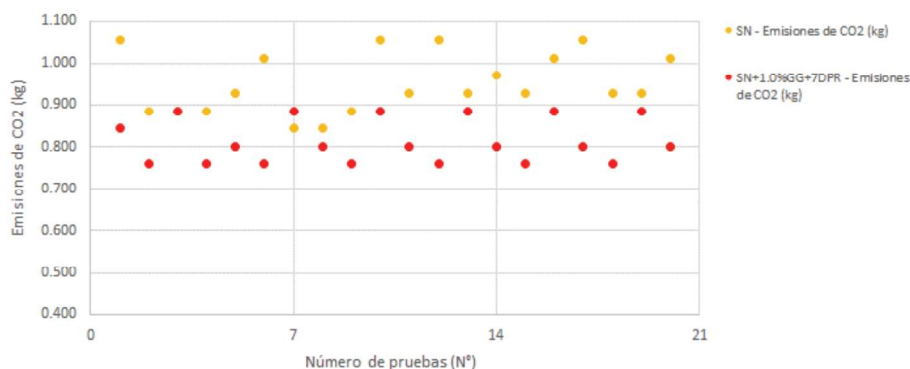


Fig. 8 – Dispersión de pruebas realizadas para los escenarios de SN vs SN+1,0%GG+7DPR, respecto a la cantidad de emisiones de CO_2 producidas

La Figura 9, ofrece una representación porcentual de las emisiones totales de CO_2 para cada escenario. Este gráfico demuestra de forma contundente que el segmento asociado a las emisiones del escenario SN+1,0%GG+7DPR (16,276 kg, en amarillo) es notablemente más pequeño que el segmento que representa las emisiones del escenario SN (19,017 kg, en rojo). Esta visualización directa subraya la magnitud de la reducción total de emisiones lograda por el escenario SN+1,0%GG+7DPR a lo largo de todas las pruebas.

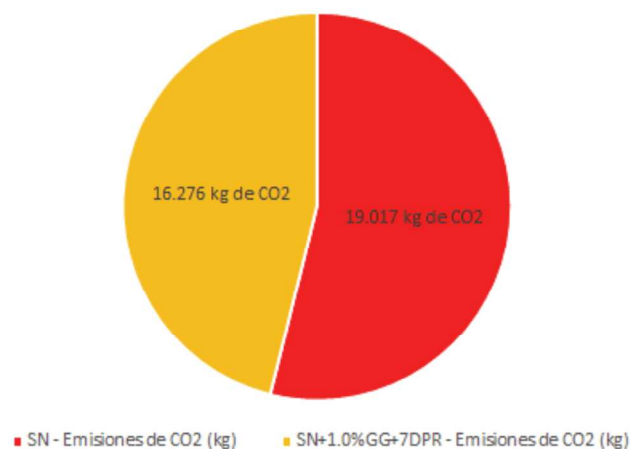


Fig. 9 – Cantidades totales de emisiones de CO₂ para los escenarios de SN vs SN+1,0%GG+7DPR, expresada en kilogramos.

5 – DISCUSIÓN

La mejora observada en los parámetros de compactación con la adición del 1,0% de GG, referida a la máxima densidad seca y el aumento de la capacidad de soporte del suelo, encuentra respaldo en la literatura científica. Investigaciones previas han demostrado que el GG, en dosificaciones óptimas, es capaz de generar una mejora en la resistencia y soporte de los materiales arcillosos (Ramani et al., 2020; Bagarack et al., 2021). Específicamente, se ha reportado que la adición de GG incide positivamente en la mejora de la resistencia al corte en arcillas tratadas (Cheng y Gengy, 2021), y en el grado de compactación, densidad seca y densidad in situ para arenas bien graduadas (Aneska y Kalyumba, 2024; Bolduan et al., 2022). Esta sinergia entre el biopolímero y las propiedades del suelo permite alcanzar los objetivos de compactación con una menor cantidad de trabajo, lo que se traduce directamente en la eficiencia energética y la reducción de la huella de carbono del equipo.

No obstante, es crucial señalar que el aumento en la proporción de adición del GG más allá de la dosificación óptima tiende a generar inestabilidad en las características de compactación. Esto podría atribuirse a la formación de agregados o geles que impiden una distribución uniforme de la fuerza de compactación, o a una saturación del suelo que compromete su trabajabilidad. La optimización de las cualidades geotécnicas se ve reflejada específicamente al 1,0% de dosificación de GG, resultando en una ganancia positiva de resistencia y soporte del material, así como una mejora en el módulo resiliente y control de grietas en subrasantes expansivas (Ipekhuaya & Chibuyov, 2022). Estos hallazgos sugieren que existe un punto de equilibrio donde la adición del biopolímero maximiza los beneficios geotécnicos sin comprometer la eficiencia de la compactación.

Aunque el proceso de compactación mecánica genera esfuerzos cortantes que podrían interrumpir inicialmente la formación de redes poliméricas, el GG presenta una capacidad de reordenamiento molecular en sus enlaces de hidrógeno e iónicos durante la fase posterior de curado (DPR). Este fenómeno permite que, tras la densificación del suelo, las cadenas del biopolímero se aproximen de forma más efectiva a las superficies de las partículas, consolidando una matriz cementante que se fortalece conforme el hidrogel pierde humedad y madura, compensando cualquier rotura de enlaces ocurrida durante la manipulación mecánica inicial y garantizando la estabilidad de la estructura del suelo mejorado.

6 – CONSIDERACIONES FINALES

La adición del GG demostró tener un impacto positivo en el grado de compactación, así como también en la huella de carbono para arenas bien graduadas, mejorando su desempeño para aplicaciones de rellenos estructurales.

Se evidenció un incremento significativo en el grado de compactación del suelo, pasando del 93 % en su estado natural al 97 % tras la incorporación del 1,0 % de GG y 7 % de DPR. Este resultado supera el valor mínimo del 95 % exigido por la normativa vigente del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2013) para rellenos estructurales, lo que implica una mejora en la densidad seca, la capacidad portante y la estabilidad del terreno, favoreciendo su desempeño en aplicaciones de ingeniería civil.

Se concluye que el uso del GG en una dosificación de 1,0 % GG + 7 % DPR contribuyó a la reducción de las emisiones de CO₂, disminuyendo de 19,017 kg (suelo natural) a 16,276 kg. Esta reducción representa una mejora ambiental relevante del 14,41 %, atribuible a la mayor eficiencia en la compactación del suelo tratado, que requirió un menor uso del equipo mecánico. Por tanto, el empleo del GG no solo mejora las propiedades geotécnicas del suelo, sino que también aporta al desarrollo de prácticas más sostenibles en ingeniería civil, alineadas con los objetivos de mitigación del cambio climático.

Con la adición del 1,0 % de GG y 7 % de DPR, se registró un aumento en la densidad máxima seca de 2,271 g/cm³ (suelo sin tratar) a 2,356 g/cm³, lo que representa un incremento del 3,52 %. De igual forma, la densidad seca in situ se elevó de 2,101 g/cm³ a 2,280 g/cm³, equivalente a una mejora del 7,42 %. Estos resultados evidencian una optimización en el comportamiento del suelo, favoreciendo su compacidad y resistencia, lo cual es clave para aplicaciones en obras de infraestructura y rellenos estructurales.

Se determinó que la dosificación óptima del GG corresponde al 1,0 % de GG y 7 % de DPR, logrando una mejora significativa en las propiedades del suelo. Al superar el 2,0 % de adición, la mezcla pierde trabajabilidad y consistencia, lo que resalta la importancia de mantener una dosificación precisa para garantizar la eficacia del tratamiento y la estabilidad del material compactado.

El presente trabajo demostró que el GG es un aditivo prometedor para mejorar las propiedades geotécnicas de suelos constituidos por arenas bien graduadas, ofreciendo beneficios significativos en el grado de compactación y estabilidad. Sus posibles aplicaciones en el campo de la ingeniería geotécnica incluyen terraplenes, carreteras, cimentaciones, rellenos de excavaciones y la construcción de plataformas, proporcionando rellenos estructurales más eficientes, duraderos y económicamente rentables, con un impacto ambiental reducido en comparación con métodos tradicionales. No obstante, es fundamental considerar ciertas limitaciones relacionadas con su uso. La dosificación óptima resulta crucial, ya que exceder ciertos niveles puede afectar negativamente la trabajabilidad y consistencia del suelo. Asimismo, la sensibilidad del GG a los cambios bruscos de temperatura requiere una evaluación cuidadosa en condiciones de campo. Por ello, se recomienda realizar pruebas detalladas y ajustes específicos según las condiciones de cada proyecto, asegurando una implementación exitosa, sostenible y técnicamente viable. Finalmente, como aporte ambiental, la evaluación de la huella de carbono permitió evidenciar que el uso del GG no solo mejora el desempeño técnico del suelo, sino que también promueve una alternativa más sostenible frente a los métodos convencionales. La implementación de este aditivo reduce la necesidad de uso prolongado de maquinaria pesada gracias a su eficacia en la compactación, lo que implica un menor consumo de combustible y, por ende, un impacto ambiental reducido. Esta característica posiciona al GG como una solución viable para proyectos de ingeniería geotécnica que buscan integrar criterios de sostenibilidad en sus procesos constructivos.

7 – AGRADECIMENTOS

El autor expresa su más sincero agradecimiento al Ing. Valentín Huallparimachi y al Ing. Juan Gómez, responsables del área de investigación de la UNSAAC, por su valioso respaldo durante el desarrollo de este trabajo. De igual manera, se agradece a la Dra. Luz Matilde García Godos Peñaloza, Coordinadora Académica de la EPIC-USMP, por el constante apoyo brindado. Este trabajo es resultado del compromiso y acompañamiento recibido; muchas gracias.

8 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aneke, F. I.; Hassan, M. M. (2023). *Resilient performance of expansive subgrades stabilized with nanosized and activated fly ash*. In 6th Intern. Conference on Road and Rail Infrastructure.
- Aneke, I. F.; Shamshad, A.; Denis, K.; Siddiqua, S. (2024). *Enhancing dynamic shear resistance and efficient micro-void reduction of expansive soil using activated nano-desilicated fly ash*. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 10 (4), 72. <https://doi.org/10.1007/s40891-024-00582-y>
- Aneska, F. I.; Kalyumba, D. (2024). *Durability and resilient creep assessment of a nanoslag-based geopolymer-treated expansive subgrade*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences, 1332 (1), 012001.
- ASTM D 1556 (2015). Standard test method for in situ density and water content of soil and fill materials by sand cone method. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D 1557 (2012). Standard test methods for laboratory compaction of soils using modified energy. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D 422 (2007). Standard method for the analysis of soil particle size distribution by sieving. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D 4318 (2017). Standard methods for liquid, plastic and soil shrinkage limits. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D 4944 (2018). Standard test method for determination of water content in soil using a calcium carbide tester. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM C 127-15 (2015). Standard test method for relative density (apacific gravity) and absorption of coarse aggregate. American Society for Testing and Materials, USA.
- Bagriacik, B., Ok, B.; Kahiyah, M. T. M. A. (2021). *An experimental study on improvement of cohesive soil with eco-friendly guar gum*. Soils and Rocks, 44, pp. 1-9. <https://doi.org/10.28927/SR.2021.060020>
- Cheng, Z.; Gengy, X., (2021). *Soil consistency and interparticle characteristics of various types of clay stabilization biopolymers*. Geomechanics and Engineering, 27 (2), pp. 103-113. <https://doi.org/10.12989/gae.2021.27.2.103>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Volumen 2 – Energía*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/>
- Ikechukwu, A. F. (2023, November). *Sustainable stabilization of reinforced polymerized subgrades under cyclic loading*. In International Conference on Building Resources for Environmentally Sustainable Technologies (pp. 315–322). Singapore: Springer Nature Singapore.

- Ikechukwu, A. F.; Chibuzor, O. K. (2022). *Enhancement of resilient modulus and cyclic crack restraint in preloaded expansive subgrades treated with a nanogeopolymer binder*. Arabian Journal of Geosciences, 15 (15), 1340.
- Kahiyah, M. T. M. A. (2020). *Engineering research properties of biopolymer-enhanced clay soils*. Master's thesis. Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Turquia.
- Kumar, S.; Ramani, E. (2021). *Experimental investigation on the shear strength and deformation behaviour of xanthan gum and guar gum treated clayey sand*. Geomechanics and Engineering, 26 (2), pp. 101-115. <https://doi.org/10.12989/gae.2021.26.2.101>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Especificaciones técnicas generales de construcción*. Perú.
- Natural Resources Canada (2014). *Fuel consumption and CO₂ emissions: Burning 1 L of gasoline produces approximately 2.3 kg of CO₂*. Government of Canada. https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oe/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_6_e.pdf
- Onyelowe, K. C.; Onyia, M. E.; Aneke, F. I.; Bui-Van, D.; Rollins, K. M. (2022). *Evaluation of compressive strength, durability, and erodibility of expansive soils stabilized with quarry dust-based geopolymer cement*. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments, and Design, 5 (1), pp. 81–90.
- Ramani, E.; Sirvaraman, S.; Kumar, A. (2020). *Impact of hydration and gelation properties of guar gum on soil modification mechanism*. Arabic Journal of Geosciences, 13 (1278). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06258-x>
- Retuerto, V. G.; Gonzales, J. A. (2022). *Increase in the support capacity of the unstable soils of the Av. Naranjal in San Martín de Porres - Lima, through stabilization with biopolymer Lignin*. Thesis for bachelor's degree. Peruvian University of Applied Sciences, Lima, Perú.
- Shrivastava, A.; Saxena, A.; Sachan, A. (2024). *Effect of guar gum biopolymer on shear strength and liquefaction response of coal ash*. In: Jose, B.T., Sahoo, D.K., Puppala, A.J., Reddy, C.N.V.S., Abraham, B.M., Vaidya, R. (eds) Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2022 Volume 3. IGC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 478. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1745-3_20
- Soldo, A.; Miletic, M. (2022). *Durability against wetting-drying cycles of sustainable soils treated with biopolymers*. Polymers, 14, 4247. <https://doi.org/10.3390/polym14194247>
- Sujatha, E. R.; Saisree, S. (2019). *Geotechnical behavior of soil treated with guar gum*. Soil and Foundation, 59 (6), pp. 2155-2166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.012>
- Verbal, F. (2020). *Consideraciones básicas sobre la compactación del suelo*. Revista de Ingeniería de la Construcción. Revista de Ingeniería de la Construcción, (3), pp. 46-62.
- Villalta, V. J.; Chang, B. E. (2020). *Estudio experimental de las propiedades físicas, mecánicas y de resistencia de suelos arcillosos mediante el uso de puzolana natural, polvo de ladrillo y goma guar en San Cristóbal-Huancavelica*. Tesis de grado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.