

Meta-análisis de la resistencia a la compresión no confinada de suelos estabilizados con goma Xanthan

Meta-analysis of the unconfined compressive strength of Xanthan gum-stabilized soils.

César Edilberto Arbulú Jurado^{1*}, Adán Wilbert Solórzano Montesinos¹ & Michaelle Pierina Solórzano Morales²

¹Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de San Antonio Abad, Cusco, Perú

²Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

* Autor corresponsal:

César Edilberto Arbulú Jurado
cesar.arbulu@unsaac.edu.pe

Citar como: Arbulú, C. E., Solórzano, A. W. & Solórzano, M. P. (2024). Meta-análisis de la resistencia a la compresión no confinada de suelos estabilizados con goma Xanthan.

Ambiente, Comportamiento y Sociedad, 7(2), 82 - 99.
<https://doi.org/10.51343/racs.v7i2.1523>

Recibido: 08 de noviembre de 2024

Aceptado: 21 de mayo de 2025

Resumen

La estabilización del suelo se orienta a la mejora de las características de suelos con limitaciones técnicas mediante la incorporación de materiales adicionales, generando así suelos optimizados para soportar cargas estructurales y prevenir daños geotécnicos. La bioestabilización emplea métodos biológicos como una opción alternativa al uso de cemento, cuyo empleo trae graves consecuencias ambientales. El polisacárido extracelular bacteriano denominado goma Xanthan ha sido objeto de estudio como estabilizante del suelo. No obstante, la diversidad de resultados presentes en la literatura científica subraya la necesidad de una consolidación de los efectos observados sobre la propiedad geotécnica de resistencia a la compresión simple. En el presente estudio, se consolidaron los valores de compresión simple documentados en artículos indexados mediante un metaanálisis de 27 artículos. Los principales hallazgos incluyen el desarrollo de una superficie de respuesta para los valores de compresión simple en distintos tipos de suelos, considerando variados tiempos de curado y diferentes dosificaciones de goma Xanthan. Se concluye que la cantidad de goma Xanthan aplicada al suelo puede clasificarse en micro, meso y macro dosis. Asimismo, los períodos de curado necesarios para alcanzar mejoras en la resistencia oscilan desde unas pocas horas hasta varios meses. La efectividad de la goma Xanthan para incrementar la resistencia a la compresión simple está fuertemente influenciada por el tipo de suelo; se ha determinado que la resistencia puede cuadruplicarse en las arcillas. Finalmente, se han identificado las principales lagunas de conocimiento vinculadas a la estabilización de suelos mediante goma Xanthan.

Palabras clave: : Estabilización de suelos, compresión no confinada, goma Xanthan.



© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Ambiente, Comportamiento y Sociedad de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribucion 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

Abstract

Soil stabilization is aimed at improving the characteristics of soils with technical limitations through the incorporation of additional materials, thus generating soils that are optimized to support structural loads and prevent geotechnical damage. Biostabilization employs biological methods as an alternative to the use of cement, the use of which has serious environmental consequences. The extracellular bacterial polysaccharide called Xanthan gum has been studied as a soil stabilizer. However, the diversity of results in the scientific literature underlines the need for a consolidation of the observed effects on the geotechnical property of simple compressive strength. In the present study, the values of simple compression documented in indexed articles were consolidated through a meta-analysis of 27 articles. The main findings include the development of a response surface for simple compression values in different types of soils, considering varied curing times and different dosages of Xanthan gum. It is concluded that the amount of Xanthan gum applied to the soil can be classified into micro, meso and macro dosages. Also, the curing periods required to achieve strength improvements range from a few hours to several months. The effectiveness of Xanthan gum in increasing simple compressive strength is strongly influenced by soil type; it has been determined that strength can be quadrupled in clays. Finally, the main knowledge gaps related to soil stabilization by Xanthan gum have been identified.

Keywords: Soil stabilization, unconfined compressive strength, Xanthan gum.

Introducción

Se proyecta que la población urbana mundial experimente un incremento de 340 millones a 6400 millones entre los años 2009 y 2050; asimismo, se anticipa un crecimiento significativo en la industria de la construcción para dar cabida a la población urbana del mundo. Por lo tanto, existirá una gran demanda para el uso de materiales basados en biopolímeros en la ingeniería civil (Ashby, 2015). Por otro lado, la eliminación in situ de grandes volúmenes de suelo de desmonte con propiedades geotécnicas desfavorables, es un problema de costos importante para las empresas de movimiento de tierras. El uso de estabilizadores de suelo tradicionales, como la cal o el cemento, puede alterar el pH de los suelos enmendados, lo que podría causar impactos ambientales negativos, incluido un desarrollo deficiente de la vegetación, una calidad del agua subterránea desmejorada e incluso problemas potenciales para la salud humana (Chang et al., 2015).

El considerable consumo energético asociado a la producción de cemento constituye un problema relevante debido a sus múltiples impactos ambientales. Este proceso conlleva un uso significativo de agua, afectando la disponibilidad de

este recurso esencial, y produce emisiones sustanciales de dióxido de carbono (CO₂), contribuyendo de manera significativa al cambio climático global. Además, se caracteriza por una pronunciada dependencia de combustibles fósiles, lo que incrementa la huella ambiental, y por la extracción intensiva de materias primas, tales como la piedra caliza, que conduce a la degradación de los ecosistemas. A esto se añade la generación de polvo y residuos, que deterioran la calidad del aire y presentan desafíos adicionales en la gestión ambiental. Ante esta situación, resulta crucial explorar alternativas sostenibles que permitan mitigar los efectos adversos asociados al uso del cemento. En este contexto, se destaca la posibilidad de disminuir el empleo de cemento y sus subproductos industriales mediante la sustitución por biopolímeros, como la goma Xanthan. Estudios recientes indican que los biopolímeros poseen un potencial significativo para reducir las emisiones globales de CO₂ y las cargas ambientales, al tiempo que mejoran la resistencia de los materiales (Ayeldeen et al., 2017). Su implementación en áreas como la ingeniería geotécnica, la construcción de pavimentos y otras aplicaciones dentro de la ingeniería civil y la arquitectura responde a la creciente demanda de prácticas respetuosas con el medio ambiente y alineadas con los principios de sostenibilidad (S. Lee et al., 2017). Así, la incorporación de la goma Xanthan y otros biopolímeros emerge como una alternativa viable y congruente con los objetivos de desarrollo sostenible, ofreciendo un enfoque innovador para abordar los retos ambientales derivados de la producción tradicional de cemento.

Los biopolímeros son carbono neutrales y sostenibles, y siempre se clasifican como materiales renovables porque están hecho de cultivos no alimentarios. Por lo tanto, el uso de biopolímeros en ingeniería geotécnica creará una industria sostenible (Stupp & Braun, 1997). Los polímeros naturales comúnmente utilizados son la fibrina, la goma Xanthan, la pectina, el ácido hialurónico, el pululano, la inulina, el sulfato de condroitina, la carragenina, la carboximetilcelulosa, la agarosa, el colágeno, el quitosano, el azúcar, la gelatina, los alginatos y la dextrina. La unión entre nanopartículas y polímeros naturales mejora la estabilidad química y las propiedades mecánicas del producto final (Y. Chen, 2019). Ya en la década de los ochenta, los ingenieros de petróleo utilizaron goma Xanthan junto a geles de cromo trivalente para mejorar la eficiencia de barrido de las inundaciones de agua en los campos petroleros de América del Norte, mejorando los perfiles de flujo de pozos de inyección. El proceso consistió en colocar selectivamente el biopolímero en las zonas de filtración, una vez desarrollada la fuerza del gel, se comprobó que éste desvió el flujo de agua (Avery et al., 1986).

Los biopolímeros son los polímeros naturales fabricados químicamente a partir de material biológico o completamente biosintetizados por organismos vivos. Consisten en exopolisacáridos producidos a partir de microorganismos, que constituyen monosacáridos que se unen entre sí. Mejoran la agregación del suelo, la bioobstrucción, la biocementación, la mitigación del potencial de licuefacción, etc. (Ivanov & Chu, 2008). Las bacterias aeróbicas pueden ser aplicables para la biocementación,

la bioobstrucción y la unión biológica de partículas del suelo. La bioobstrucción implica llenar los poros del suelo u otros materiales con microbios para reducir su conductividad hidráulica y porosidad (Kupolati et al., 2019) (Mendonça et al., 2021) (Ramdas et al., 2021).

Cuando el azúcar es fermentado aeróbicamente por las *Xanthomonas campestris*, produce un polisacárido aniónico llamado goma Xanthan. Este polisacárido contiene cadenas lineales de β -D-glucosa enlazadas en 1,4 en las que todos los demás elementos están emparejados con una cadena lateral de trisacárido cargado que consta de D-glucosa enlazada entre dos elementos D-manosa ocupados por elementos aldehído. Dado que es un biopolímero aniónico, la goma Xanthan puede absorber moléculas de agua formando enlaces de hidrógeno y formar hidrogeles viscosos. Esto conduce a la formación de hidrogeles más fuertes (Joga & Varaprasad, 2019).

Puzrin (2012) sostiene que el suelo es un material muy complejo de describir matemáticamente, dado que es: a) Multifásico; b) Multi granular; c) Heterogéneo; y, d) Anisótropo, por lo que, rara vez hay circunscripciones nítidas entre un suelo individual y otro, más bien, las propiedades cambian progresivamente de una parte del suelo a otra adyacente. Los suelos en el campo son heterogéneos; es decir, las características del perfil no son exactamente las mismas en dos puntos cualesquiera dentro de la masa del suelo que se elige examinar (Weil & Brady, 2017), por ende, el comportamiento de los suelos ante la aplicación de cualquier sustancia para mejorarlo, en este caso la goma Xanthan, es muy variado.

Acerca de los suelos se puede decir que, la resistencia a la compresión no confinada (UCS por sus siglas en inglés) es un parámetro importante en ingeniería civil, el cual se utiliza para determinar la resistencia del suelo. Se define como el esfuerzo de compresión axial máximo que puede soportar una muestra cilíndrica de suelo en condiciones no confinadas (Alshkane et al., 2020). El ensayo UCS se destaca como uno de los métodos ampliamente utilizados para evaluar el comportamiento al corte de suelos, debido a que ofrece una evaluación rápida y económica de la resistencia al corte (Das, 2017). El ensayo no es aplicable a suelos sin cohesión o de grano grueso (Kavazanjian Jr & Matasovic, 2020).

Material y Métodos

Chalmers & Altman (1995) definieron la revisión sistemática como una revisión que se prepara utilizando un “enfoque sistemático para minimizar los sesgos y los errores aleatorios documentados en una sección de materiales y métodos” de los artículos científicos. Patole (2021) explica el sistema PICOTS para enmarcar y responder a la pregunta de un meta análisis, los componentes de este sistema son: P: población, I: pronóstico de la intervención, C: factores de comparación, O: resultados de interés vinculados al pronóstico, T: temporalidad, S: entorno del pronóstico bajo estudio. Los métodos y

materiales se relacionan con el estudio específico del presente análisis al permitir la consolidación de resultados de otras investigaciones a través de un proceso estadístico de meta análisis.

Los criterios de elegibilidad de los resultados para ser incorporados en el meta análisis han sido: a) Población: todo tipo de suelo que haya sido estudiado bajo los efectos de la incorporación de goma Xanthan, se exceptúan las rocas; b) Intervención: sólo se han tomado en cuenta los estudios que han reportado la incorporación de la goma Xanthan en el suelo, en cualquier porcentaje de dosis y sin el efecto combinado de otras sustancias. La aplicación de la goma Xanthan pudo ser de mezclado por vía seca o húmeda; c) Control: se ha incluido como control de tratamiento a los resultados de ensayos en suelos naturales; d) Resultado: el principal resultado evaluado ha sido la resistencia a la compresión simple UCS, por sus siglas en inglés; e) Temporalidad: se han considerado los estudios para cualquiera que sea el tiempo de curado que hayan tenido los suelos antes de su ensayo UCS; y, f) Entorno: sólo se han tomado en cuenta los estudios realizados en laboratorio, bajo condiciones no controladas de curado, es decir curado a temperatura y humedad ambiente.

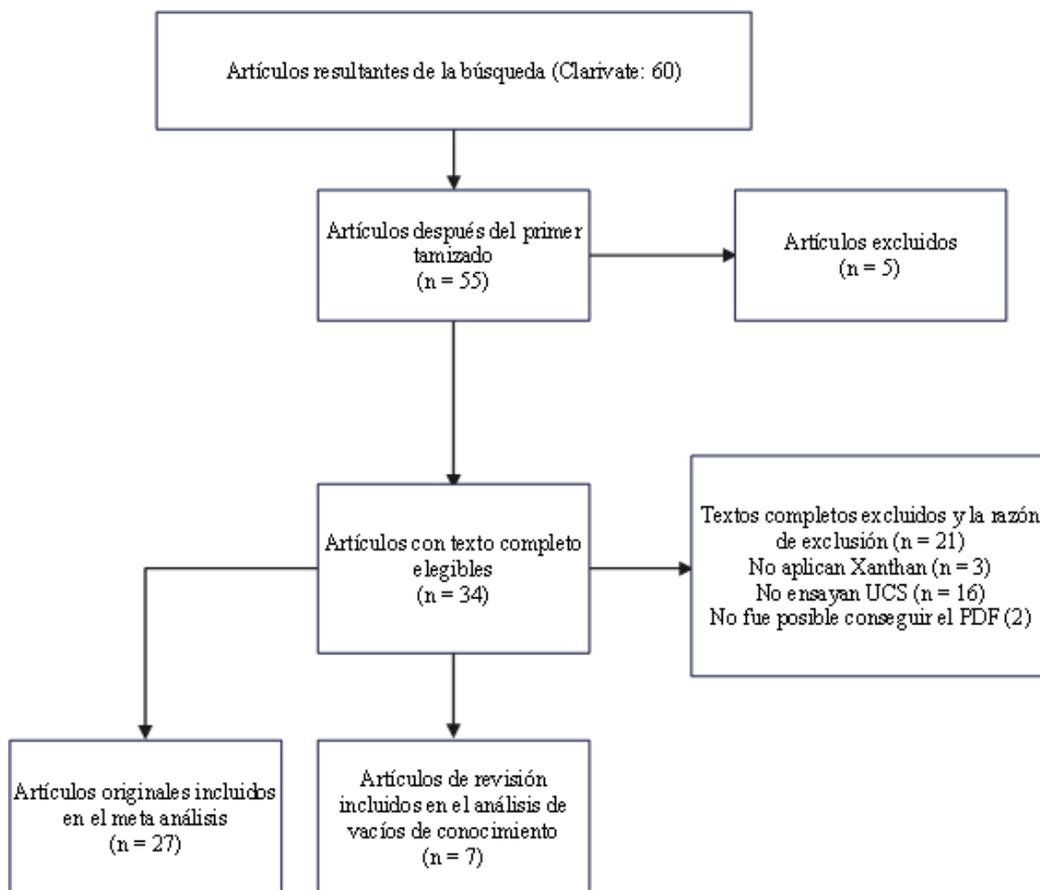
Dentro de la base de datos de Clarivate, se hizo la búsqueda de los siguientes términos: “soil”, “compressive strength” y “Xanthan”, obteniéndose 60 artículos indexados cuya distribución se aprecia en la Figura 1. Conforme se ve, el efecto de la goma Xanthan en el suelo ha sido estudiado desde varias especialidades, en particular por la ingeniería civil, la ingeniería geológica y la ingeniería ambiental entre otras. Del total de 60 artículos, 27 fueron seleccionados para el meta análisis y otros siete para la revisión de los vacíos de conocimiento en el tema. El proceso de selección de los artículos se aprecia en la Figura 2.

Figura 1

Distribución de los artículos por especialidad.

25 Engineering Civil	17 Construction Building Technology	8 Engineering Environmental	8 Geosciences Multidisciplinary
20 Engineering Geological	16 Materials Science Multidisciplinary	5 Environmental Sciences	4 Green Sustainable Technology
		5 Polymer Science	2 Chem Multi

Fuente: Clarivate. (2023).

Figura 2*Tamizaje de los artículos para el meta análisis.**Fuente:* Autores.

El listado completo de los artículos considerados para el presente análisis, con sus respectivos autores, año de publicación, lugar de extracción de las muestras de suelo y dosis de goma Xanthan aplicadas en los experimentos, se puede evidenciar en el Apéndice 1.

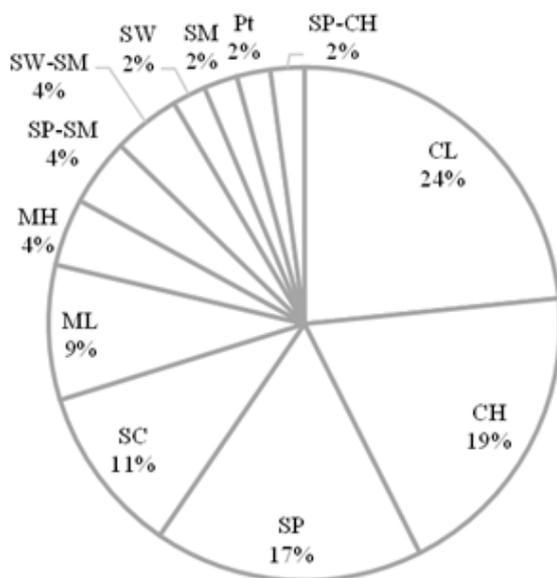
Resultados

Tipos de Suelos Estudiados

Del total de artículos no todos cumplían todos los criterios de selección, sin embargo, la mayoría de ellos aplicaban la goma Xanthan a distintos tipos de suelos, para determinar la frecuencia de dichos suelos se estableció la descripción estadística que se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Estadística de los tipos de suelo estudiados en los artículos.



Fuente: Autores.

Tal como se aprecia, los suelos a los que más se ha estudiado su aplicación con goma Xanthan son las arcilla tanto de baja como de alta plasticidad, las arenas pobremente graduadas, así como las arenas arcillosas; además, los suelos menos estudiados en cuanto a su aplicación con goma Xanthan son las arenas bien graduadas y los suelos orgánicos. Se debe mencionar que, la mayor parte de los estudios reportan la clasificación SUCS del suelo como parte de la caracterización del material, en algunos casos puntuales se ha obtenido dicha caracterización a partir de las gráficas de granulometría y plasticidad reportadas en los mismos estudios, para determinar el tipo de suelo.

Costo Económico y Ambiental de la Incorporación de Xanthan en el Suelo

En los estudios revisados, la incorporación de la goma Xanthan se ha hecho mezclando varias dosis o porcentajes de dicha sustancia al suelo, la mayoría de los estudios lo reporta en proporción al suelo seco del suelo tratado. Se han utilizado diversas dosificaciones que van desde el 0.1% hasta el 5% como máximo. Conforme se aprecia en el Apéndice 1, la dosis más utilizada es la de 1.0%, seguida de las dosis de 0.5%, 2.0% y 1.5%. Son apenas dos estudios que aplican dosis sumamente bajas (0.1%). Cabe entonces preguntarse si, desde el punto de vista económico, la incorporación de dosis de goma Xanthan en cualquier suelo con el fin de mejorar sus prestaciones mecánicas es viable.

En esos sentidos, los costos de producción de la goma Xanthan han disminuido en la última década (12.5 US\$ a principios de los años noventa) conforme lo evidencia el estudio de Mendonça et al. (2021). Para el año 2023

el precio de la goma Xanthan de fineza 80 bordea los 2.0 dólares americanos por kilogramo con tendencia al alza; si se adquiere por toneladas, este costo puede alcanzar hasta 1.8 US\$ por kilogramo (Alibaba, 2023). China es el mayor fabricante mundial de este producto y la industria de gas y petróleo en los Estados Unidos de Norteamérica su mayor consumidor (Adroit, 2023).

Aquí se debe recordar que el cemento Portland Tipo III presenta la alteración más significativa del pH natural del suelo en las primeras horas tras su aplicación, atribuible a su granulometría más fina y a su mayor contenido en cal libre. No obstante, a medio y largo plazo, todos los tipos de cemento Portland (Tipos I-III) estabilizan el pH dentro de rangos altamente alcalinos (12-13) debido a la liberación de iones de hidróxido alcalino (OH⁻) como subproducto de la hidratación. Este aumento en el pH puede afectar a los organismos biológicos y, por lo tanto, podría tener efectos perjudiciales (Chang et al., 2016): por esto, resulta interesante comparar el costo del tratamiento de una tonelada de suelo tanto la goma Xanthan como el Cemento Portland, considerando el costo de la emisión de CO₂, esto se muestra en la Tabla 1. Se observa que el costo asociado al tratamiento del suelo mediante el uso de goma Xanthan es aproximadamente la mitad del costo inherente al tratamiento con Cemento Portland tipo I.

Tabla 1

Viabilidad económico-ambiental de la goma Xanthan.

Tratamiento del suelo	Cemento	Xanthan
Precio de mercado (US\$/ton)	125.5 ^a	1800.0 ^b
Cantidad para que una tonelada de suelo CL (A7) supere los 1.8 MPa ^c	70 kg (7.0%) ^c	10 kg (1.0%)
Costo en US\$ del material para 1 TM de suelo	8.80	18.00
Emisión de CO ₂ por 1 kg de producción de material (kg CO ₂) ^d	+1.25	-4.97
Emisión de CO ₂ relacionada con el tratamiento 1 tonelada de suelo (kg CO ₂)	+87.50	-89.60
Comercio de emisiones de CO ₂ relacionado con el tratamiento del suelo de 1 tonelada (US\$) ^e	+8.86	-9.07
Costo en US\$ de una tonelada de suelo tratado, considerando el costo de la emisión de CO ₂	17.66	8.93

Fuentes:

^a Precio a agosto de 2022 según IBISWorld (2023) y Statista (2023).

^b Precio a enero de 2023 según Alibaba (2023).

^c El porcentaje más bajo posible según se especifica en MTC (2013, p. 247).

^d Chang et al. (2016).

^e 101.28 US\$/Ton de CO₂, Trading Economics (2023).

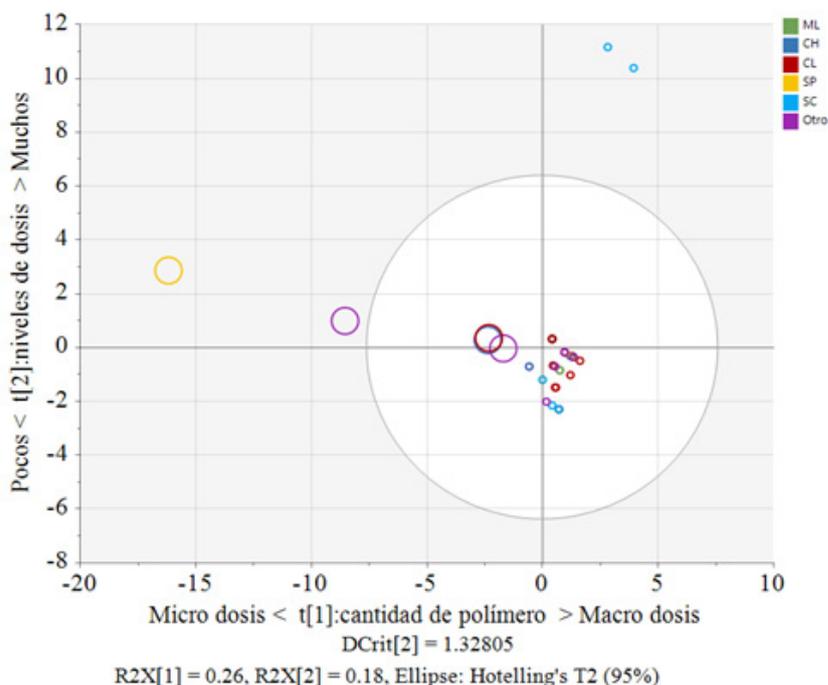
Conforme se aprecia, el costo del tratamiento de un suelo cuando no está en consideración los costos ambientales, resulta ser menor para el cemento en comparación con la goma Xanthan, sin embargo, cuando en el análisis del costo se considera la valorización de la emisión del dióxido de carbono para producir tanto el cemento como la goma, entonces resulta ser que la goma Xanthan tiene un menor costo ambiental.

Dosis de Xanthan Incorporado a los Distintos Suelos

Ahora bien, con la finalidad de dilucidar cual es la tendencia en la aplicación de los porcentajes de dosis de goma Xanthan en los estudios revisados, se ha efectuado el análisis de componentes principales de los datos del Apéndice 1, obteniéndose la Figura 4. Se aprecia que hay divisiones en cuanto a la magnitud de las dosis aplicadas: a) micro dosis (entre 0.1% a 0.4%), meso dosis (entre 0.5% y 1.5%) y macro dosis (entre 2% a 5%). Estas dosis se correlacionaron con el tipo de suelo reportado, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 2.

Figura 4

Tendencia de los niveles de dosis de goma Xanthan según el tipo de suelo.



Fuente: Autores.

Tabla 2*Correlación de dosis aplicadas según tipos de suelo.*

	Dosis porcentual de goma Xanthan	Correlación con el tipo de suelo					
	%	CH	CL	ML	Otro	SC	SP
Micro dosis	0.10	-0.10	0.13	-0.06	-0.11	-0.07	0.18
	0.20	0.09	-0.14	-0.08	0.08	-0.09	0.11
	0.25	-0.10	-0.12	-0.06	-0.11	0.61	-0.10
	0.40	-0.10	-0.12	-0.06	0.15	-0.07	0.18
	0.50	0.10	0.06	0.21	-0.09	-0.21	-0.05
Meso dosis	0.60	-0.10	-0.12	-0.06	0.15	-0.07	0.18
	0.75	-0.10	-0.12	-0.06	-0.11	0.61	-0.10
	0.80	0.17	-0.12	-0.06	0.15	-0.07	-0.10
	0.90	-0.07	-0.08	-0.04	-0.08	-0.05	0.33
	1.00	0.13	0.14	0.08	-0.29	0.09	-0.11
Macro dosis	1.25	-0.10	-0.12	-0.06	-0.11	0.61	-0.10
	1.50	0.13	0.01	-0.17	-0.03	-0.09	0.08
	2.00	-0.06	0.23	0.08	-0.13	0.13	-0.23
	2.50	0.14	0.24	-0.12	-0.04	-0.13	-0.17
	3.00	-0.18	0.22	0.15	-0.21	0.10	-0.03
	4.00	-0.05	0.05	-0.13	-0.07	0.24	-0.03
	5.00	0.14	-0.04	-0.16	-0.14	0.33	-0.10

Nota: Las correlaciones positivas indican preferencia del autor de la investigación en aplicar dicha dosis a cierto tipo de suelo.

Fuente: Autores

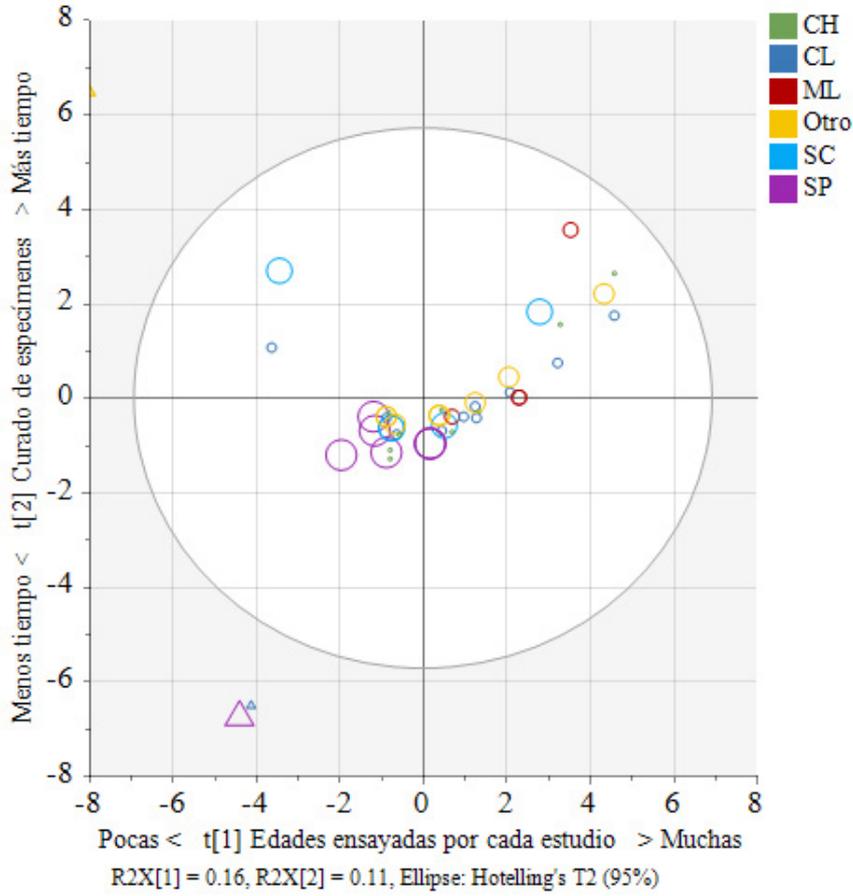
Conforme se aprecia, los investigadores prefieren aplicar micro y meso dosis a las arenas, mientras que las macro dosis parecen estar reservadas para las arcillas.

Tiempo de Curado de los Especímenes Adicionados con Goma Xanthan

El desarrollo de la reacción química de reticulación de la goma Xanthan, la cual facilita la adherencia de los granos del suelo y, por ende, mejora la resistencia a la compresión uniaxial, demanda un período de curado; las investigaciones revisadas tienen distintos tiempos para este proceso, los cuales van desde unas pocas horas hasta varios meses. Con la finalidad de discernir cuál es la tendencia de los investigadores respecto del tiempo de curado se procedió analizar los componentes principales de los tiempos de curado detallados en el Apéndice 2, produciéndose la Figura 5 y la Tabla 3.

Figura 5

Tendencia de los tiempos de curado según el tipo de suelo.



Fuente: Autores.

Tabla 3

Correlación de tiempos de curado según tipos de suelo.

Plazo	Días de curado	CH	CL	ML	SC	SP	Otro
	0.04	-0.13	0.06	-0.08	-0.09	-0.12	0.29
	1	-0.13	-0.14	0.23	0.47	-0.12	-0.14
Muy corto (1 semana)	2	0.30	-0.08	-0.04	-0.05	-0.07	-0.08
	3	0.07	-0.25	-0.14	0.03	-0.21	0.46
	4	0.24	-0.17	0.18	-0.11	0.06	-0.16
	5	-0.13	-0.14	-0.08	0.19	-0.12	0.29
	7	0.07	0.15	0.25	-0.14	-0.20	-0.10
	10	-0.07	-0.08	0.48	-0.05	-0.07	-0.08
Mediano (1 mes)	14	0.16	0.19	-0.03	-0.07	-0.17	-0.11
	21	-0.10	0.13	-0.06	-0.07	0.18	-0.11
	28	-0.04	-0.08	0.20	0.07	-0.20	0.11
	30	-0.10	-0.12	-0.06	-0.07	-0.10	0.41
	45	-0.13	0.06	0.54	-0.09	-0.12	-0.14
Largo (trimestral)	56	-0.10	0.13	-0.06	0.27	-0.10	-0.11
	60	0.18	0.14	-0.11	-0.12	-0.16	-0.01
	63	-0.10	0.13	-0.06	-0.07	0.18	-0.11
	90	-0.12	0.08	0.21	-0.01	-0.24	0.11
Muy largo (anual)	180	-0.10	0.13	-0.06	-0.07	-0.10	0.15
	365	0.30	-0.08	-0.04	-0.05	-0.07	-0.08
	750	0.30	-0.08	-0.04	-0.05	-0.07	-0.08

Fuente: Autores.

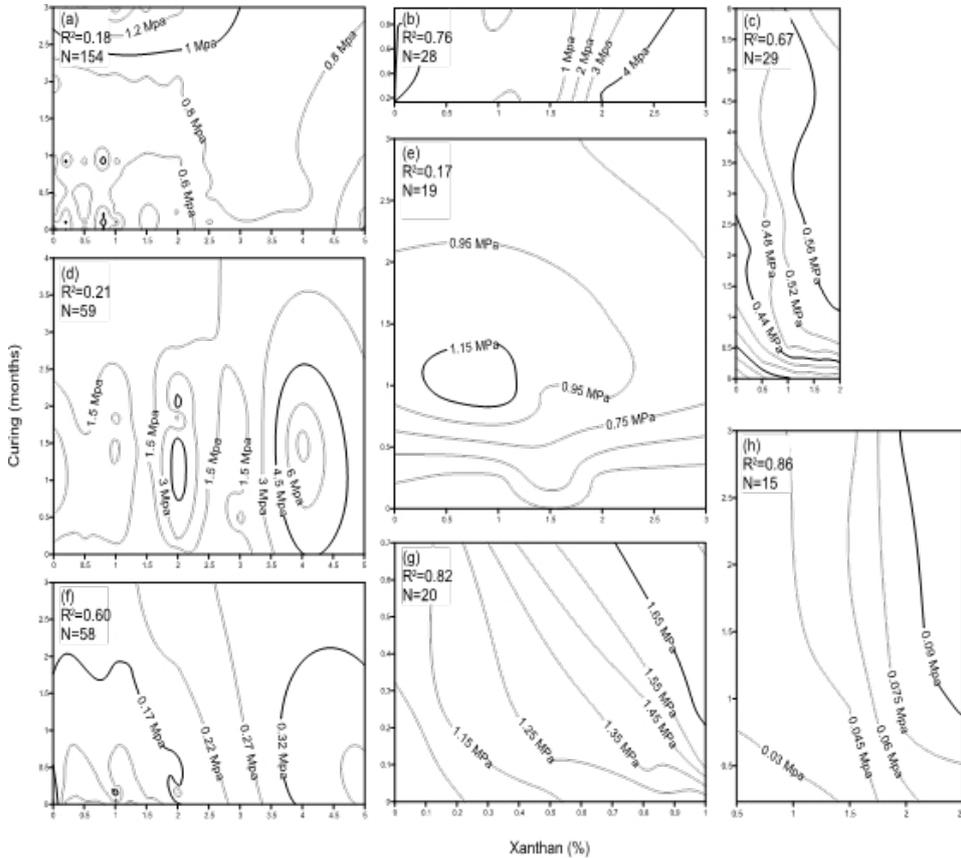
Conforme se aprecia, tanto las arcillas de baja plasticidad como las altamente plásticas han sido estudiadas con preferencia en el plazo corto, es decir, su resistencia a la compresión simple se ha medido después de alrededor de una semana; por lo demás, hay una gran variedad de plazos de curado que los investigadores han usado y no parece haber una tendencia evidente.

Superficie de Respuesta de Valores de Compresión Simple para Varios Suelos

En general, los biopolímeros tienen superficies específicas altas con cargas eléctricas, lo que permite interacciones directas entre los biopolímeros y las partículas finas del suelo, proporcionando así alta resistencia (Chang et al., 2016). Para evaluar dicha resistencia se han compilado los valores de la resistencia a la compresión simple de 27 de los 47 estudios antes señalados, el listado completo de valores recopilados para el meta análisis ML; f) arena arcillosa SC; g) limo de alta plasticidad MH y h) Suelo orgánico Pt.

Figura 6

Superficies de respuesta de valores UCS para varios suelos para distintos tiempos de curado y dosis de goma Xanthan.



Fuente: Autores.

Conclusiones

Para las arcillas de alta plasticidad CH, la resistencia compresiva tiene resultados muy variables, esto se refleja en el bajo coeficiente de determinación de la superficie de contorno calculada, con relativamente alto número de resultados. La resistencia máxima se alcanza con dosis de entre 0.5% y 2.5% de goma Xanthan y tiempos de curado mayores a 2.5 meses (Figura 6 a). En el caso de la arena SP, los resultados son más consistentes, mostrándose que la resistencia compresiva se desarrolla para dosis de goma Xanthan mayores al 2%, y que, prácticamente los resultados de la resistencia se alcanzan para tiempos de curado muy cortos, menores al mes (Figura 6 b).

Para el caso de las arenas con limo, la superficie de contorno muestra poca variabilidad y por tanto buena consistencia del modelo. Se ve que la resistencia crece de manera modesta, al aplicarle dosis de goma Xanthan mayores al 2%, y aun cuando los ensayos se han realizado después de periodos de curado de hasta 6 meses, el curado no parece tener un factor importante en la resistencia (Figura 6 c).

Para el caso de la arcilla de baja plasticidad, la superficie también resulta con mucha variabilidad, aun así, se puede inferir que la máxima resistencia suele alcanzarse con dosis muy altas de goma Xanthan por encima del 4% y con períodos de curado de 1.5 meses (Figura 6 d).

La superficie de respuesta del limo también evidencia una baja representatividad de los resultados, pero permite ver que la mayor resistencia está entre las dosis de 0.5% y 1.0% para un tiempo de curado promedio de un mes (Figura 6 e). Para el caso de la arena arcillosa, la superficie es moderadamente representativa y evidencia un crecimiento bastante bajo de la resistencia de dicho suelo aún con dosis sumamente altas por encima del 5%, el tiempo de curado parece no incidir en la ganancia de resistencia de dichos suelos (Figura 6 f).

Para el limo de alta plasticidad la superficie es altamente representativa y evidencia que la máxima resistencia se ha alcanzado con dosis de alrededor de 1% de goma Xanthan y que el tiempo de curado si tiene un efecto parcial en la ganancia de dicha resistencia (Figura 6 g). Finalmente, para el caso del suelo orgánico se tiene una superficie con una representatividad alta, la cual muestra que con dosis moderadas de Xanthan se puede incluso triplicar la resistencia de dicho suelo, sin embargo, el tiempo de curado parece no favorecer la resistencia más allá del mes (Figura 6 h).

La cantidad de goma Xanthan aplicada al suelo puede ser en micro, meso y macro dosis; además, los periodos de curación de los suelos para obtener mejoras sustanciales en la resistencia varían desde unas horas hasta meses. Asimismo, la efectividad de la goma Xanthan para mejorar la resistencia a la compresión simple depende grandemente del tipo de suelo y se encontró que la resistencia puede cuaduplicarse en arcillas; luego, los tipos de suelo más estudiados aplicando goma Xanthan son arcillas y arenas, habiendo suelos como la turba poco estudiados en este sentido.

Se espera comprender mejor las propiedades físicas y químicas de los biopolímeros y luego aplicarlos adecuadamente ajustándolos a las distintas características geográficas (Jang & Jia, 2020). También se requieren investigaciones para la utilización de materiales inorgánicos en la matriz de nanocelulosa, ya que podría afectar su sostenibilidad (Kupolati et al., 2019). Para ser práctica y económicamente aplicable en obras in situ, varios factores como la trabajabilidad, el costo, el equipo adecuado y el problema ambiental deben evaluarse más a fondo (Choi et al., 2020).

Aunque los biopolímeros muestran muchos beneficios, se requiere más investigación para reducir la brecha entre los estudios de laboratorio y la implementación de campo. Además, el equipo de construcción debe desarrollarse o modificarse teniendo en cuenta la reología química de los biopolímeros. Además, la falta de investigación se puede observar en el papel de los biopolímeros utilizados en aplicaciones de pavimentos, evidenciándose que aún se necesita más investigación para evaluar su durabilidad cíclica a largo plazo bajo tráfico o cargas sísmicas.

Aún cuando la susceptibilidad al agua también es diferente de un biopolímero a otro, la sensibilidad al agua se considera una cuestión fundamental de los biopolímeros en el tratamiento del suelo; la pérdida de resistencia y el comportamiento aparente de expansión y contracción son graves inconvenientes (Fatehi et al., 2021). Otros factores a investigar están relacionados con: la durabilidad del suelo tratado con biopolímeros, ciclos de humectación y secado, ciclos de congelación y descongelación, ataques de microorganismos y exposición a la radiación ultravioleta, dado que podrían disminuir significativamente su efecto sobre la resistencia.

Las limitaciones y desafíos asociados con los biopolímeros también se derivan de su capacidad de biodegradación y están sujetos a la selección de métodos de mezcla para diversas aplicaciones de campo; temperatura predominante, humedad relativa y condiciones de pH del suelo a tratar. Por otro lado, la combinación de dos o más biopolímeros ha demostrado una mejor resistencia a la degradación debido a la trabazón mejorada de los monómeros (Moghal & Vydehi, 2021), por lo que el diseño de multi biopolímeros es una oportunidad de investigación latente.

En cuanto a la normativa estándar, es esencial desarrollar protocolos adecuados para la evaluación de biopolímeros estabilizantes. La valoración de las propiedades in situ de los suelos estabilizados, basada en los resultados de pruebas de laboratorio, continúa siendo un asunto relevante pero aún incompleto (Huang et al., 2021). Asimismo, es necesario realizar investigaciones adicionales sobre los polímeros y sus interacciones con diferentes mezclas de suelos, considerando la amplia variedad de polímeros existentes y la posibilidad de diseñar nuevos polímeros cuando se proporcionan las directrices objetivas necesarias, en lugar de emplear simplemente un subproducto de otra aplicación. En resumen, se recomienda un examen exhaustivo de las interacciones entre polímeros y suelos, y se postula el diseño de nuevos polímeros específicamente ajustados para la estabilización de suelos, tomando en cuenta las necesidades identificadas en los estudios discutidos en el presente artículo.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses financieros ni personales que puedan influir inconvenientemente en el desarrollo de este artículo.

Referencias

- Adroit. (2023). *Xanthan gum market application and region global forecast 2022 to 2031*. <https://www.adroitmarketresearch.com/industry-reports/xanthan-gum-market>
- Alibaba. (2023). *Xanthan gum - Xanthan gum manufacturers, suppliers and exporters on Alibaba.com food additives*. https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=yyIndexArea=product_enyCatId=ytab=allySearchText=xanthan+gum
- Alshkane, Y., Rashed, K., y Daoud, H. (2020). Unconfined compressive strength (UCS) and compressibility indices predictions from dynamic cone penetrometer index (DCP) for cohesive soil in Kurdistan Region/Iraq. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 3683–3695.
- Anandha, S., y Sujatha, E. R. (2021). Compaction and permeability characteristics of biopolymer-treated soil. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 79. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5101-7_11
- Arbulu-Jurado, C. (2023, 30 de enero). *Meta-analysis of the unconfined compressive strength of soils with Xanthan - Database*. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/5QJ9G>
- Ashby, M. (2015). *Materials and sustainable development*. <https://doi.org/10.1007/s11741-998-0069-x>
- Avery, M. R., Burkholder, L. A., y Gruenenfelder, M. A. (1986). Use of crosslinked Xanthan gels in actual profile modification field projects. *Society of Petroleum Engineers of AIME*, (Paper) SPE, 2. <https://doi.org/10.2118/14114-ms>
- Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., y Kitazume, M. (2017). Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2). <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.007>
- Bagheri, P., Gratchev, I., y Rybachuk, M. (2023). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil mechanical properties. *Applied Sciences*, 13(2), 887. <https://doi.org/10.3390/app13020887>
- Cabalar, A. F., Awraheem, M. H., y Khalaf, M. M. (2018). Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002380](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002380)
- Chalmers, I., y Altman, D. G. (1995). *Systematic reviews*. BMJ Publishing Group.

- Chang, I., Im, J., y Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability (Switzerland)*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/su8030251>
- Chang, I., Im, J., Prasadhi, A. K., y Cho, G. C. (2015). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026>
- Chen, C., Wei, K., Gu, J., Huang, X., Dai, X., y Liu, Q. (2022). Combined effect of biopolymer and fiber inclusions on unconfined compressive strength of soft soil. *Polymers*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/polym14040787>
- Chen, Y. (2019). *Hydrogels based on natural polymers*. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00171-1>
- Choi, S. G., Chang, I., Lee, M., Lee, J. H., Han, J. T., y Kwon, T. H. (2020). Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers. *Construction and Building Materials*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118415>
- Das, B. M. (2017). *Principles of geotechnical engineering*. Cengage Learning.
- Elkafoury, A., y Azzam, W. (2021). Utilize Xanthan gum for enhancing CBR value of used cooking oil-contaminated fine sand subgrade soil for pavement structures. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00389-6>
- Fatehi, H., Ong, D., Yu, J., y Chang, I. (2021). Biopolymers as green binders for soil improvement in geotechnical applications: A review. *Geosciences (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/geosciences11070291>
- Ghasemzadeh, H., Mehrpajouh, A., y Pishvaei, M. (2022). Compressive strength of acrylic polymer-stabilized kaolinite clay modified with different additives. *ACS Omega*, 7(23), 19204–19215. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00236>
- Ghasemzadeh, H., y Modiri, F. (2020). Application of novel Persian gum hydrocolloid in soil stabilization. *Carbohydrate Polymers*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116639>
- Ghasemzadeh, H., Modiri, F., y Darvishan, E. (2022). A novel clean biopolymer-based additive to improve mechanical and microstructural properties of clayey soil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(3). <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02234-5>

- Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., Ijaz, N., Ijaz, Z. ur., y Rehman, Z. ur. (2022). Strengthening potential of xanthan gum biopolymer in stabilizing weak subgrade soil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(9), 2719–2738. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02347-5>
- Hamza, M., Zhihong, N., Aziz, M., Ijaz, N., Ameer, M., y Ijaz, Z. (2022). Geotechnical properties of problematic expansive subgrade stabilized with xanthan gum biopolymer. *Road Materials and Pavement Design*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2092027>
- Huang, J., Kogbara, R. B., Hariharan, N., Masad, E. A., y Little, D. N. (2021). A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124685>
- IBISWorld. (2023). *Price of cement - United States*. <https://www.ibisworld.com/us/bed/price-of-cement/190/>
- Jang, J., y Jia, P. (2020). A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1465709>
- Joga, J. R., y Varaprasad, B. J. S. (2020). Effect of xanthan gum biopolymer on dispersive properties of soils. *World Journal of Engineering*, 17(4). <https://doi.org/10.1108/WJE-05-2020-0152>
- Joga, J. R., y Varaprasad, B. J. S. (2019). Sustainable improvement of expansive clays using Xanthan gum as a biopolymer. *Civil Engineering Journal*, 5(9). <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091380>
- Kang, X., Bate, B., Chen, R.-P., Yang, W., y Wang, F. (2019). Physicochemical and mechanical properties of polymer-amended kaolinite and fly ash–kaolinite mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002705](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002705)
- Kavazanjian, E., Jr., y Matasovic, N. (2020). *Geotechnical engineering: Principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. John Wiley y Sons.
- Khosravi, M., Tabarsa, A. R., Osouli, A., y Latifi, N. (2020). *A biopolymer-based waterproofing mortar for irrigation channel joints*. <https://doi.org/10.1061/9780784482834.018>

- Kupolati, W. K., Sadiku, E. R., Frattari, A., Adeboje, A. O., Kambole, C., Mojapelo, K. S., Maite, M. R., Motsilanyane, N., Bezuidenhout, W., Eze, A. A., Ibrahim, I. D., Labana, B. J., Adegbola, T. A., Snyman, J., Moloisane, R. J., y Berkers, R. F. A. (2019). *Biopolymers and nanocomposites in civil engineering applications*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8063-1_15
- Kwon, Y. M., Chang, I., Lee, M., y Cho, G. C. (2019). Geotechnical engineering behavior of biopolymer-treated soft marine soil. *Geomechanics and Engineering*, 17(5). <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.453>
- Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Abd Majid, M. Z., Tahir, M. M., y Mohamad, E. T. (2017). Improvement of problematic soils with biopolymer—An environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001706](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001706)
- Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Majid, M. Z. A., y Rashid, A. S. A. (2016). Xanthan gum biopolymer: An eco-friendly additive for stabilization of tropical organic peat. *Environmental Earth Sciences*, 75(9). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5643-0>
- Lee, M., Kwon, Y.-M., Park, D.-Y., Chang, I., y Cho, G.-C. (2022). Durability and strength degradation of xanthan gum-based biopolymer treated soil subjected to severe weathering cycles. *Scientific Reports*, 12(1), 19453. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23823-4>
- Lee, S., Chang, I., Chung, M. K., Kim, Y., y Kee, J. (2017). Geotechnical shear behavior of xanthan gum biopolymer treated sand from direct shear testing. *Geomechanics and Engineering*, 12(5). <https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.5.831>
- Lee, S., Chung, M., Park, H. M., Song, K.-I., y Chang, I. (2019). Xanthan gum biopolymer as soil-stabilization binder for road construction using local soil in Sri Lanka. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002909](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002909)
- Mendonça, A., Morais, P. V., Pires, A. C., Chung, A. P., y Oliveira, P. V. (2021). A review on the importance of microbial biopolymers such as xanthan gum to improve soil properties. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/app11010170>
- Moghal, A. A. B., y Vydehi, K. V. (2021). State-of-the-art review on efficacy of xanthan gum and guar gum inclusion on the engineering behavior of soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00462-8>
- MTC. (2013). *Manual de carreteras. Especificaciones técnicas generales para construcción (EG-2013)*.

- Muguda, S., Booth, S., Hughes, P. N., Augarde, C. E., Perlot, C., Bruno, A. W., y Gallipoli, D. (2017). Mechanical properties of biopolymer-stabilised soil-based construction materials. *Geotechnique Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1680/jgele.17.00081>
- Ni, J., Hao, G. L., Chen, J. Q., Ma, L., y Geng, X. Y. (2021). The optimisation analysis of sand-clay mixtures stabilised with xanthan gum biopolymers. *Sustainability (Switzerland)*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/su13073732>
- Ni, J., Li, S. S., Ma, y Geng, X. (2020). Performance of soils enhanced with eco-friendly biopolymers in unconfined compression strength tests and fatigue loading tests. *Construction and Building Materials*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120039>
- Patole, A. (2021). *Principles and practice of systematic reviews and meta-analysis*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71921-0>
- Puzrin, A. (2012). *Constitutive modelling in geomechanics: Introduction*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27395-7>
- Ramachandran, A., Ghalib, M., Dhama, N., Cheema, D., y Mukherjee, A. (2022). Multi-functional performance of biopolymers and biocement in stabilisation of road bases. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 0(0), 1–15. <https://doi.org/10.1680/jcoma.21.00063>
- Ramdas, V., Mandree, P., Mgangira, M., Mukaratirwa, S., Lalloo, R., y Ramchuran, S. (2021). Review of current and future bio-based stabilisation products (enzymatic and polymeric) for road construction materials. *Transportation Geotechnics*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100458>
- Rashid, A., Latifi, N., Meehan, C., y Manahiloh, K. (2017). Sustainable improvement of tropical residual soil using an environmentally friendly additive. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(6). <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0265-1>
- Rashid, A., Tabatabaei, S., Horpibulsuk, S., Mohd Yunus, N., y Hassan, W. (2019). Shear strength improvement of lateritic soil stabilized by biopolymer based stabilizer. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(6). <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00944-8>
- Reddy, N., Nongmaithem, R., Basu, D., y Rao, B. (2020). Application of biopolymers for improving the strength characteristics of red mud waste. *Environmental Geotechnics*, 9(6). <https://doi.org/10.1680/jenge.19.00018>

- Seo, S., Lee, M., Im, J., Kwon, Y., Chung, M., Cho, G., y Chang, I. (2021). Site application of biopolymer-based soil treatment (BPST) for slope surface protection: In-situ wet-spraying method and strengthening effect verification. *Construction and Building Materials*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124983>
- Singh, S., y Das, R. (2020). Geo-engineering properties of expansive soil treated with xanthan gum biopolymer. *Geomechanics and Geoengineering*, 15(2). <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1632495>
- Singh, S., Das, R., y Seth, D. (2021). Plasticity and strength characteristics of expansive soil treated with Xanthan gum biopolymer. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 88. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6237-2_54
- Stanford Center for Earth Resources Forecasting. (2023). *Software*. <https://scerf.stanford.edu/resources/software>
- Soldo, A., y Miletić, M. (2019). Study on shear strength of Xanthan gum-amended soil. *Sustainability (Switzerland)*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/su11216142>
- Soldo, A., Miletić, M., y Auad, M. (2020). Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57135-x>
- Statista. (2023). *U.S. cement prices 2021*. <https://www.statista.com/statistics/219339/us-prices-of-cement/>
- Stupp, S., y Braun, P. (1997). Molecular manipulation of microstructures: Biomaterials, ceramics, and semiconductors. *Science*, 277(5330). <https://doi.org/10.1126/science.277.5330.1242>
- Sujatha, E., Atchaya, S., Sivasaran, A., y Keerdthe, R. (2021). Enhancing the geotechnical properties of soil using xanthan gum—An eco-friendly alternative to traditional stabilizers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2). <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02010-7>
- Sulaiman, H., Taha, M., Abd Rahman, N., y Mohd Taib, A. (2022). Performance of soil stabilized with biopolymer materials – xanthan gum and guar gum. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, Article 103276. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2022.103276>
- Toufigh, V., y Ghassemi, P. (2020). Control and stabilization of fugitive dust: Using eco-friendly and sustainable materials. *International Journal of Geomechanics*, 20(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001762](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001762)

Trading Economics. (2023). *EU carbon permits - 2023*. <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>

Vydehi, K., y Moghal, A. (2022). Effect of biopolymeric stabilization on the strength and compressibility characteristics of cohesive soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004068](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004068)

Weil, R., y Brady, N. (2017). *The nature and properties of soils*. Pearson.

Apéndice A. Dosis de Goma Xanthan Incorporadas al Suelo

Tabla 4
Dosis de Goma Xanthan Incorporadas al Suelo.

N	Ref.	Año	Lugar de extracción del suelo	Suelo	Dosis de Xanthan															¿CBR?	¿SEM?						
					0.1	0.2	0.25	0.4	0.5	0.6	0.75	0.8	0.9	1	1.25	1.5	2	2.5	3			4	5				
	(Bagheri et al., 2023)	2023	Gold Coast, Australia																								
	(Hamza, Nie, et al., 2022)	2022																									
	(Ghasemzadeh, Modiri, et al., 2022)	2022																									
	(Vydehi & Moghal, 2022)	2022																									
	(Ramachandran et al., 2022)	2022																									
	(C. Chen et al., 2022)	2022																									
	(Sulaiman et al., 2022)	2022																									
	(Ghasemzadeh, Mehrpajouh, et al., 2022)	2022																									
	(Hamza, Zhihong, et al., 2022)	2022																									
	(M. Lee et al., 2022)	2022	Jumunjin sand	SP										si			si									si	
	(M. Lee et al., 2022)	2022	Korean residual soil	SC										si			si									si	
	(Seo et al., 2021)	2021																									
	(Anandha Kumar & Sujatha, 2021)	2021	Tamil Nadu	SC			si		si		si			si		si		si								si	
	(Sujatha et al., 2021)	2021	Srirangam	SC			si		si		si			si		si		si		si		si				si	
	(Elkafoury & Azzam, 2021)	2021	Egypt	SP	si	si		si		si			si												si		
	(Singh et al., 2021)	2021	Odisha.	MH		si			si			si		si												si	
	(Ni et al., 2021)	2021	Fujian	SP										si			si		si		si		si			si	
	(Ni et al., 2021)	2021	Caolinita	CL										si			si		si		si		si			si	
	(Ni et al., 2021)	2021	Bentonita	CH										si			si		si		si		si			si	
	(Singh & Das, 2020)	2020	Rourkela	CH		si			si			si		si												si	
	(Ghasemzadeh & Modiri, 2020)	2020	Caolinita comercial	CL					si					si		si		si		si		si				si	
	(Reddy et al., 2020)	2020	Lanjigarh	ML					si					si			si		si		si					si	

(Reddy et al., 2020)	2020	Damanjodi	ML		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Soldo et al., 2020)	2020	Piedmont	SW-SM				si		si		si		si		si		si		si			
(Ni et al., 2020)	2020	Northwest Shanghai	SC				si		si		si		si		si		si		si			
(Joga & B.J.S, 2020)	2020	Karnataka	SP-SM		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Joga & B.J.S, 2020)	2020	Kardigere	CL		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Toufigh & Ghassemi, 2020)	2020	Urmia lake bed*	ML		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Toufigh & Ghassemi, 2020)	2020	Hooralazim lagoon*	SP		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Toufigh & Ghassemi, 2020)	2020	Sungun copper mine*	SP		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Khosravi et al., 2020)	2020	Mix*	SP-CH		si										si		si					
(S. Lee et al., 2019)	2019	Jaffna, Sri Lanka	SM				si		si		si		si		si		si		si			
(Soldo & Miletić, 2019)	2019	Alabama	SW-SM				si				si									si		
(Kwon et al., 2019)	2019	Yeosu, Korea	CH				si				si											
(Rashid et al., 2019)	2019	Hilly, Malasya	CH		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Joga & Varaprasad, 2019)	2019	Andhra Pradesh, India.	CH		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Kang et al., 2019)	2019	Caolinita	CL	si	si		si		si		si		si		si		si		si			
(Cabalar et al., 2018)	2018	Gaziantep University	CL		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Rashid et al., 2017)	2017	Johor, Malaysia	MH		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Muguda et al., 2017)	2017	Mix*	SP		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Latifi et al., 2017)	2017	Western Malaysian Peninsula	CH		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Latifi et al., 2017)	2017	Western Malaysian Peninsula	CL		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Latifi et al., 2016)	2016	West Johore	Pt		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Chang et al., 2015)	2015	Jumunjin	SP		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Chang et al., 2015)	2015	Cheonan	SP-SM		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Chang et al., 2015)	2015	Hwangtoh	CH		si		si		si		si		si		si		si		si			
(Chang et al., 2015)	2015	Caolinita	CL		si		si		si		si		si		si		si		si			
			Frecuencia	2	3	2	1	26	1	2	2	1	35	2	21	21	5	11	5	6	1	31
			Porcentaje	1.1	1.7	1.1	0.6	14.6	0.6	1.1	1.1	0.6	19.7	1.1	11.8	11.8	2.8	6.2	2.8	3.4	2.7	83.8

Apéndice B. Tiempo de curado de los ensayos según cada estudio.

Tabla 5

Tiempo de curado de los ensayos según cada estudio.

N	Ref.	Suelo	Tiempo de curado (días)																		
			0.0	1	2	3	4	5	7	14	28	3	4	5	6	6	9	1	365	75	
			4						0		1		0	5	6	0	3	0	8	0	
																				0	
1	(Bagheri et al., 2023)	ML		si		si		si	si	si		si									
2	(Hamza, Nie, et al., 2022)	CH				si		si	si	si						si					
3	(Ghasemzadeh, Modiri, et al., 2022)	CL						si													
4	(Vydehi & Moghal, 2022)	CL						si	si	si		si		si		si					
5	(Ramachandran et al., 2022)	SP				si															
6	(C. Chen et al., 2022)	CL						si		si											
7	(Sulaiman et al., 2022)	SC		si		si															
8	(Ghasemzadeh et al., 2022)	CL						si													
9	(Hamza et al., 2022)	CH				si	si	si	si	si				si					si		
10	(M. Lee et al., 2022)	SP								si											
11	(M. Lee et al., 2022)	SC								si											
12	(Seo et al., 2021)	SW								si											
13	(Anandha Kumar & Sujatha, 2021)	SC				si	si	si	si	si											
14	(Sujatha et al., 2021)	SC		si			si	si	si	si				si		si					
15	(Elkafoury & Azzam, 2021)	SP								si											
16	(Singh et al., 2021)	MH				si	si	si	si	si											
17	(Ni et al., 2021)	SP							si												
18	(Ni et al., 2021)	CL							si												
19	(Ni et al., 2021)	CH							si												
20	(Singh & Das, 2020)	CH				si	si	si	si	si											
21	(Ghasemzadeh & Modiri, 2020)	CL					si	si	si	si									si		
22	(Reddy et al., 2020)	ML					si	si	si	si		si	si	si					si		

23	(Reddy et al., 2020)	ML		si		si	si		si
24	(Soldo et al., 2020)	SW- SM	si		si			si	
25	(Ni et al., 2020)	SC					si		
26	(Joga & B.J.S, 2020)	SP- SM		si	si	si		si	si si
27	(Joga & B.J.S, 2020)	CL		si	si	si		si	si si
28	(Toufigh & Ghassemi, 2020)	ML		si		si			
29	(Toufigh & Ghassemi, 2020)	SP		si		si			
30	(Toufigh & Ghassemi, 2020)	SP		si		si			
31	(Khosravi et al., 2020)	SP- CH		si	si		si		
32	(S. Lee et al., 2019)	SM		si			si		
33	(Soldo & Miletic, 2019)	SW- SM	si		si			si	
34	(Kwon et al., 2019)	CH		si	si				
35	(Rashid et al., 2019)	CH		si	si	si			
36	(Joga & Varaprasad, 2019)	CH					si		
37	(Kang et al., 2019)	CL	si						
38	(Cabalar et al., 2018)	CL			si		si	si	
39	(Rashid et al., 2017)	MH		si	si	si	si		si
40	(Muguda et al., 2017)	SP			si		si		
41	(Latifi et al., 2017)	CH			si		si		si
42	(Latifi et al., 2017)	CL			si		si		si
43	(Latifi et al., 2016)	Pt		si	si		si		si
44	(Chang et al., 2015)	SP					si		si
45	(Chang et al., 2015)	SP- SM					si		
46	(Chang et al., 2015)	CH					si		si
47	(Chang et al., 2015)	CL					si		si