

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Efecto de la goma Xanthan y microfibras de Oedogonium en
la resistencia a la compresión no confinada de un suelo
blando de Juliaca para mejorar capacidad portante**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Yulissa Huachalla Pomari
Isela Nelia Choque Peralta

Asesor:

Mg. Gerardo William Pari Quispe

Juliaca, mayo de 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mg. Gerardo William Pari Quispe, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **"EFECTO DE LA GOMA XANTHAN Y MICROFIBRAS DE OEDOGONIUM EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA DE UN SUELO BLANDO DE JULIACA PARA MEJORAR CAPACIDAD PORTANTE"** de los autores Yulissa Huachalla Pomari y Isela Nelía Choque Peralta, tiene un índice de similitud de 11% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 26 días del mes de mayo del año 2026.



Mg. Gerardo William Pari Quispe
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 19 día(s) del mes de mayo del año 2026.

las 19:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección

(de la) presidente(a):

Mg. Herson Duberly Pari Gusi el (la) secretario(a): Leonel Chahuares Pantoja

y los demás miembros:

Msc. Eder Mamani Chambi y el (la) asesor(a) Mg. Gerardo William

Pari Quipe

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Efecto de la goma Xanthan y microfibras de Oedogonium en la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante

del(los) bachiller(es): a) Yulissa Huachalla Pomari

b) Isela Nelia Choque Peralta

c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Yulissa Huachalla Pomari

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Isela Nelia Choque Peralta

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a

Asesor/a

Bachiller (a)

Miembro

Bachiller (b)

Secretario/a

Miembro

Bachiller (c)

DEDICATORIA

A nuestro Señor, por brindarnos vida, fortaleza y sabiduría para superar cada desafío y alcanzar esta importante meta académica.

A nuestros padres, por su amor incondicional, esfuerzo, sacrificio y apoyo constante durante toda nuestra formación profesional.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darnos la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar esta etapa académica.

A nuestros padres y familiares, por su apoyo, confianza y motivación constante durante nuestra formación profesional.

A nuestro asesor de tesis, por su orientación y aportes académicos que hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

A los ingenieros de la universidad, por los conocimientos compartidos a lo largo de nuestra formación.

Finalmente, a todas las personas e instituciones que contribuyeron de manera directa o indirecta en la realización de esta investigación.

Muchas gracias.

ÍNDICE

Abstract.....	1
Resumen.....	1
1. Introducción	1
2. Metodología	2
2.1. Materiales	2
2.2. Diseño Experimental.....	3
2.3. Preparación de Muestras	4
2.4. Ensayos Realizados.....	5
2.5. Procedimientos Específicos.....	5
2.6. Análisis de Datos	6
2.7. Limitaciones de estudio	6
3. Resultados	6
3.1. Efecto de la goma Xanthan en la resistencia a la compresión no confinada	6
3.2. Influencia de las microfibras de Oedogonium en la resistencia a la compresión no confinada	7
3.3. Efecto de la goma Xanthan más microfibras de Oedogonium en la resistencia a la compresión no confinada.....	8
3.4. Comparación de la resistencia a la compresión entre muestras con y sin aditivos	9
3.5. Análisis granulométrico y su relación con la resistencia a la compresión.....	11
3.6. Comportamiento de las muestras en el ensayo proctor y su impacto en la resistencia a la compresión	13
3.7. Interacción entre propiedades de Atterberg y comportamiento de compactación	14
3.8. Resultados del ensayo de corte directo y su implicación en la resistencia del suelo.....	15
3.9. Resultados Estadísticos	16
3.9.1. Interpretación de Resultados ANOVA	16
3.9.2. Análisis de Correlaciones.....	17
3.9.3. Análisis Post-hoc	17
4. Discusiones	17
5. Conclusiones	18
6. Recomendaciones.....	19
7. Referencias Bibliográficas	20
ANEXOS	23

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz del diseño experimental	3
Tabla 2. Número total de ensayos realizados	3
Tabla 3. Ensayos de laboratorio y normas técnicas aplicadas	5
Tabla 4. Resultados del ensayo de compresion no confinada para muestras con goma xanthan	6
Tabla 5. Resultados del ensayo de compresion no confinada para muestras con microfibras de Oedogonium	7
Tabla 6. Resultados del ensayo de compresión no confinada para muestras con combinación de estabilizadores	8
Tabla 7. Comparación general de la resistencia a la compresión no confinada	9
Tabla 8. Comparación de las características granulométricas, de plasticidad y resistencia a la compresión	12
Tabla 9. Características de compactación según el ensayo Proctor y resistencia a la compresión.....	13
Tabla 10. Parámetros de resistencia al corte y propiedades de compactación	15
Tabla 11. Análisis de varianza y estadísticos descriptivos por grupo de tratamiento	16
Tabla 12. Correlaciones significativas entre variables principales	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ensayo de compresión no confinada.....	2
Figura 2. Ensayo de corte directo.....	2
Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento experimental	4
Figura 4. Grafico de lineas comparativo mostrando resistencia a la compresion (kg/cm ²) vs concentracion (%)	10
Figura 5. Grafico de radar o spider chart comparando los tres tratamientos optimos en tres ejes	11
Figura 6. Gráfico de dispersión XY mostrando contenido optimo de humedad (%) en eje X vs densidad seca máxima (g/cm ³) en eje Y	11

Effect of Xanthan gum and Oedogonium microfibers on the unconfined compressive strength of a soft soil from Juliaca to improve bearing capacity

Efecto de la goma Xanthan y microfibras de Oedogonium en la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante

Huachalla Pomari Yulissa * <https://orcid.org/>
 Choque Peralta Isela Nelia * <https://orcid.org/>
 Pari Quispe Gerardo William* 1 <https://orcid.org/>

* Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Abstract

The soft soils of the Peruvian highlands present geotechnical limitations due to their low bearing capacity. This research evaluated the effect of xanthan gum and oedogonium microfibers, individually and in combination, on the unconfined compressive strength of soft soil from Juliaca. The soil was characterized using particle size analysis, Atterberg limits, standard Proctor test, and USCS classification. Samples were prepared with xanthan gum (1%, 2%, 3%), oedogonium microfibers (1%, 2%, 3%), and combinations (0.5%+0.5%, 1.0%+1.0%, 1.5%+1.5%). Unconfined compression (ASTM D2166/D2166M) and direct shear (ASTM D3080-98) tests were performed. Statistical analysis used ANOVA ($\alpha=0.05$) and Pearson correlations. The compressive strength of the control soil (1.11 kg/cm²) increased significantly with all treatments. Xanthan gum (2%) reached 1.76 kg/cm² (+58.56%), Oedogonium microfibers (1%) also reached 1.76 kg/cm² (+58.56%), and the optimal combination (1.0% + 1.0%) yielded 1.79 kg/cm² (+61.26%). ANOVA confirmed significant differences ($F = 23.323$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.92$). Cohesion increased from 0.53 kg/cm² to 0.74 kg/cm². The biostabilizers demonstrated significant effectiveness in improving the bearing capacity of the soft soil in Juliaca. The 1.0%+1.0% combination proved optimal, generating synergistic effects superior to individual treatments, representing a sustainable alternative for soil stabilization in the Peruvian highlands.

Keywords: Biostabilization, bearing capacity, Xanthan gum, Oedogonium, soft soil.

Resumen

Los suelos blandos del altiplano peruano presentan limitaciones geotécnicas por su baja capacidad portante. Esta investigación evaluó el efecto de goma Xanthan y microfibras de Oedogonium, individual y combinadamente, en la resistencia a compresión no confinada de suelo blando de Juliaca. Se caracterizó el suelo mediante análisis granulométrico, límites de Atterberg, Proctor modificado y clasificación SUCS. Se prepararon muestras con goma Xanthan (1%, 2%, 3%), microfibras de Oedogonium (1%, 2%, 3%) y combinaciones (0.5%+0.5%, 1.0%+1.0%, 1.5%+1.5%). Se realizaron ensayos de compresión no confinada (ASTM D2166/D2166M) y corte directo (ASTM D3080-98). El análisis estadístico utilizó ANOVA ($\alpha=0.05$) y correlaciones de Pearson. La resistencia del suelo patrón (1.11 kg/cm²) se incrementó significativamente con todos los tratamientos. La goma Xanthan 2% alcanzó 1.76 kg/cm² (+58.56%), las microfibras de Oedogonium 1% lograron 1.76 kg/cm² (+58.56%), y la combinación óptima 1.0%+1.0% obtuvo 1.79 kg/cm² (+61.26%). El ANOVA confirmó diferencias significativas ($F=23.323$, $p=0.001$, $\eta^2=0.92$). La cohesión incrementó de 0.53 kg/cm² a 0.74 kg/cm². Los bioestabilizadores demostraron efectividad significativa para mejorar la capacidad portante del suelo blando de Juliaca. La combinación 1.0%+1.0% resultó óptima, generando efectos sinérgicos superiores a tratamientos individuales, representando una alternativa sostenible para estabilización de suelos en el altiplano peruano.

Palabras clave: Bioestabilización, capacidad portante, goma Xanthan, Oedogonium, suelo blando.

1. Introducción

La estabilización de suelos representa uno de los desafíos fundamentales en la ingeniería geotécnica contemporánea, especialmente en regiones donde las condiciones naturales del terreno limitan significativamente el desarrollo de infraestructura. Los métodos tradicionales de mejoramiento del suelo, basados en cemento, cal y aditivos químicos sintéticos, han demostrado eficacia técnica, pero generan considerables impactos ambientales, incluyendo emisiones de CO₂, consumo energético elevado y potencial contaminación del suelo y aguas subterráneas (Kumar et al., 2024). Esta problemática ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles que mantengan la efectividad técnica mientras minimizan el impacto ecológico.

Los suelos blandos del altiplano peruano, particularmente en la región de Juliaca, presentan características geotécnicas complejas que incluyen alta plasticidad, baja capacidad portante y susceptibilidad a deformaciones, aspectos que comprometen la estabilidad de las construcciones y requieren intervenciones técnicas especializadas (Zambrano-Rendón et al., 2021). Estas condiciones geológicas específicas, combinadas con la creciente demanda de desarrollo urbano en la región, han generado una necesidad apremiante de desarrollar tecnologías de estabilización que sean tanto efectivas como ambientalmente responsables.

Los bioestabilizadores han emergido como una alternativa prometedora para la estabilización sostenible de suelos, ofreciendo mecanismos de mejoramiento basados en procesos naturales que pueden igualar o superar el desempeño de los estabilizadores convencionales. La goma Xanthan, un biopolímero producido por la fermentación bacteriana de *Xanthomonas campestris*, ha demostrado capacidad para incrementar significativamente la cohesión del suelo y mejorar su resistencia mecánica mediante la formación de enlaces intermoleculares (Baldovino et al., 2024; Gupta y Kumar, 2024). Paralelamente, las fibras naturales de algas han mostrado potencial como materiales de refuerzo en aplicaciones geotécnicas, proporcionando refuerzo estructural a través de mecanismos físicos de distribución de cargas y mejoramiento de la integridad de la matriz del suelo (Guo, 2022; Constante et al., 2015).

Las microfibras de *Oedogonium*, algas verdes filamentosas abundantes en el ecosistema del lago Titicaca, representan un recurso local renovable con características fisicoquímicas que sugieren su aplicabilidad como material de refuerzo en suelos. Su estructura celulósica y su disponibilidad regional las posicionan como una opción técnica y económicamente viable para la bioestabilización de suelos en el altiplano peruano. Sin embargo, la efectividad específica de estas microfibras en combinación con biopolímeros como la goma Xanthan no ha sido sistemáticamente evaluada en suelos blandos de la región andina.

La investigación sobre sistemas híbridos de bioestabilización, que combinan biopolímeros cohesivos con materiales de refuerzo natural, sugiere la posibilidad de efectos sinérgicos que podrían superar el desempeño de cada componente aplicado individualmente (Zhang et al., 2024). Esta hipótesis se fundamenta en la complementariedad de mecanismos de acción, donde los biopolímeros proporcionan cohesión química mientras las fibras naturales aportan refuerzo estructural, potencialmente optimizando múltiples propiedades mecánicas del suelo simultáneamente.

En este contexto, surge la pregunta de investigación: ¿cuál es el efecto de la goma Xanthan y las microfibras de *Oedogonium*, aplicadas individual y combinadamente, en la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca, y cuáles son las proporciones óptimas que maximizan la mejora en la capacidad portante del material tratado?

Para responder a esta interrogante, se diseñó un estudio experimental controlado que evalúa sistemáticamente el efecto de diferentes concentraciones de goma Xanthan (1%, 2%, 3%) y microfibras de *Oedogonium* (1%, 2%, 3%), así como sus combinaciones (0.5%+0.5%, 1.0%+1.0%, 1.5%+1.5%), en las propiedades mecánicas de un suelo blando representativo de la región de Juliaca. La investigación integra ensayos de caracterización geotécnica, compresión no confinada, corte directo y compactación, proporcionando una evaluación integral del comportamiento mecánico del suelo bioestabilizado y estableciendo las bases técnicas para la implementación de estas tecnologías sostenibles en proyectos de ingeniería geotécnica regional. Por lo tanto, el objetivo general de este estudio es evaluar el efecto de la goma Xanthan, un biopolímero producido por *Xanthomonas campestris*, y las microfibras de *Oedogonium*, algas verdes del lago Titicaca, aplicadas individual y combinadamente, en la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar su capacidad portante.

2. Metodología

2.1. Materiales

Suelo: Suelo blando procedente de Juliaca, altiplano peruano, recolectado mediante calicatas en obras en construcción dentro del perímetro urbano de Juliaca. La recolección de muestras se efectuó siguiendo criterios de identificación visual y táctil preliminar para suelos blandos (Zambrano-Rendón et al., 2021).

Bioestabilizadores; Goma Xanthan de grado comercial adquirida a través de proveedores de insumos alimenticios. Microfibras de *Oedogonium* recolectadas de las orillas del lago Titicaca en el sector de Capachica, Puno, Perú, sometidas a proceso de secado natural durante tres semanas y procesadas mediante molienda eléctrica.

Equipos: Tamices estándar ASTM (75 mm hasta No. 200 de 0.075 mm), balanza analítica (precisión 0.01 g), horno de secado ($110 \pm 5^\circ\text{C}$), equipo Proctor Modificado, equipo de corte directo con anillo de corte y deformímetros, prensa de compresión no confinada con sistema de tasa constante de carga, moldes cilíndricos (10 cm diámetro $\times$ 12 cm altura), copa de Casagrande, agitador mecánico, picnómetro, vernier.

Reactivos: Agua para preparación de mezclas.



Figura 1. Ensayo de compresión no confinada



Figura 2. Ensayo de corte directo

2.2. Diseño Experimental

Se evaluaron 10 tratamientos experimentales con 3 repeticiones cada uno, incluyendo una muestra patrón (control de referencia) también con 3 repeticiones, totalizando 30 especímenes para compresión no confinada y 30 para corte directo. El tamaño de muestra de $n=3$ repeticiones se aplicaron uniformemente a todos los grupos (patrón y tratamientos), determinándose considerando las limitaciones operativas del laboratorio y el número de tratamientos evaluados, siguiendo el criterio de tamaño mínimo aceptable para análisis ANOVA de un factor en estudios exploratorios de bioestabilización de suelos. La muestra patrón se evaluó con $n=1$ debido a que su función es establecer el valor de referencia basal de las propiedades iniciales del suelo de Juliaca. Esta aproximación es metodológicamente válida porque el control de referencia representa un punto fijo de comparación cuya variabilidad intrínseca no es el objeto de estudio, distinguiéndose de los grupos de tratamiento donde la variabilidad entre réplicas permite estimar la dispersión de resultados bajo condiciones experimentales idénticas. Las dosificaciones de goma Xanthan (1%, 2%, 3%) se establecieron considerando Singh et al. (2020) y Ni et al. (2021). Las proporciones de microfibras de Oedogonium (1%, 2%, 3%) se determinaron según Júnior et al. (2019) y Alexandre y Giovanni (2019). Las combinaciones (0.5%+0.5%, 1.0%+1.0%, 1.5%+1.5%) se diseñaron para evaluar efectos sinérgicos.

Tabla 1. Matriz del diseño experimental

Código	Tratamiento	Goma Xanthan (% peso seco)	Microfibras Oedogonium (% peso seco)	Repeticiones
MP	Muestra Patrón	0	0	3
MA1	Goma Xanthan 1%	1	0	3
MA2	Goma Xanthan 2%	2	0	3
MA3	Goma Xanthan 3%	3	0	3
MB1	Microfibras Oedogonium 1%	0	1	3
MB2	Microfibras Oedogonium 2%	0	2	3
MB3	Microfibras Oedogonium 3%	0	3	3
MC1	Combinación 0.5% + 0.5%	0.5	0.5	3
MC2	Combinación 1.0% + 1.0%	1.0	1.0	3
MC3	Combinación 1.5% + 1.5%	1.5	1.5	3

Nota: MP=Muestra Patrón, MA1=Muestra Goma Xanthan 1%, MA2=Muestra Goma Xanthan 2%, MA3=Muestra Goma Xanthan 3%, MB1=Muestra Microfibras Oedogonium 1%, MB2=Muestra Microfibras Oedogonium 2%, MB3=Muestra Microfibras Oedogonium 3%, MC1=Muestra Combinación 0.5%+0.5%, MC2=Muestra Combinación 1.0%+1.0%, MC3=Muestra Combinación 1.5%+1.5%,

No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

Tabla 2. Número total de ensayos realizados

Tipo de ensayo	Ensayos por tratamiento	Total de ensayos
Análisis granulométrico	1	10
Límites de Atterberg	1	10
Contenido de humedad	1	10
Gravedad específica	1	10
Clasificación SUCS	1	10
Proctor Modificado	1	10
Compresión no confinada	3	30
Corte directo	3	30
TOTAL	13	120

Nota: Elaboración propia.

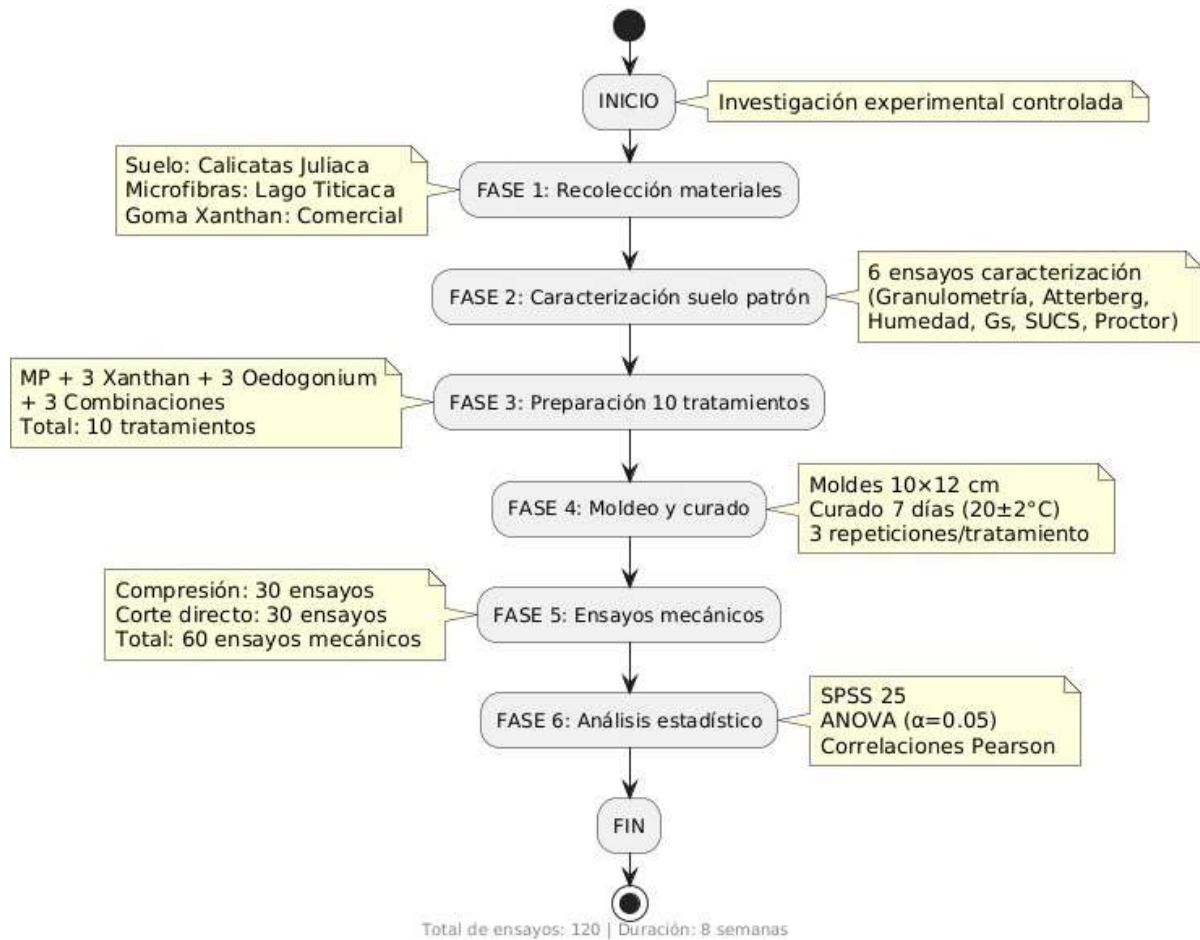


Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento experimental

2.3. Preparación de Muestras

Procesamiento del suelo: El suelo se secó al aire durante 48 horas, se disgregaron manualmente los grumos y se cuarteó para obtener muestras representativas de 500 g, siguiendo procedimientos estandarizados (Sierra-Fernández et al., 2017).

Procesamiento de microfibras de Oedogonium: Las algas recolectadas se lavaron con agua destilada, se secaron naturalmente bajo sombra durante tres semanas y se procesaron mediante molienda eléctrica hasta obtener microfibras. El proceso de molienda produjo microfibras con distribución heterogénea de longitudes y diámetros, característica inherente al procesamiento mecánico de material biológico filamentoso. No se realizó caracterización geométrica sistemática de las microfibras (longitud, diámetro, relación L/d) ni tamizado posterior para estandarizar dimensiones, representando una limitación metodológica del estudio que debe considerarse en la interpretación de resultados. La dosificación de microfibras se controló únicamente mediante porcentaje en peso seco (1%, 2%, 3%) respecto al peso del suelo seco, sin caracterización de la distribución espacial ni cuantificación de la orientación preferencial de las fibras en la matriz compactada. Esta metodología simplificada, aunque común en estudios exploratorios de bioestabilización, limita la reproducibilidad precisa de los resultados y la comprensión detallada de los mecanismos de refuerzo fibrilar, adaptando protocolos de Chaowen y Le (2019).

Preparación de mezclas con goma Xanthan: Se disolvió la goma Xanthan en agua destilada según el contenido óptimo de humedad determinado por Proctor. Se mezcló manualmente con el suelo seco durante 10 minutos hasta homogeneización completa, siguiendo recomendaciones de Dai et al. (2023).

Preparación de mezclas con microfibras de Oedogonium: Las microfibras secas se incorporaron al suelo seco mediante mezclado manual durante 15 minutos siguiendo procedimientos adaptados de Abbas et al. (2021). Se añadió agua destilada según contenido óptimo de humedad y se mezcló durante 5 minutos adicionales. El mezclado manual de 15 minutos tuvo como objetivo lograr distribución macroscópicamente uniforme de las microfibras en la matriz del suelo, sin embargo, no se implementaron técnicas de verificación cuantitativa de homogeneidad (análisis de varianza de contenido de fibras en submuestras, inspección microscópica de distribución espacial, o caracterización de orientación preferencial de fibras). La homogeneidad de la mezcla se evaluó únicamente mediante inspección visual, metodología que proporciona control cualitativo, pero no garantiza distribución estadísticamente uniforme a escala microscópica. Esta limitación en el control de homogeneidad representa una fuente potencial de variabilidad experimental que debe considerarse al interpretar la desviación estándar observada en los resultados de resistencia mecánica.

Preparación de mezclas combinadas: Se incorporaron primero las microfibras secas al suelo seco durante 15 minutos, luego se añadió la goma Xanthan disuelta en agua destilada durante 10 minutos adicionales hasta homogeneización, considerando observaciones de Mistry et al. (2018) sobre interfaz fibra-matriz.

Moldeo de especímenes: Las mezclas se compactaron en moldes cilíndricos (10 cm diámetro × 12 cm altura) aplicando la energía de compactación del Proctor Modificado. Los especímenes se desmoldaron después de 24 horas.

Curado de especímenes: Todos los especímenes se curaron a temperatura ambiente ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) durante 7 días antes de los ensayos mecánicos, manteniendo control estricto según Singh et al. (2020).

2.4. Ensayos Realizados

Tabla 3. Ensayos de laboratorio y normas técnicas aplicadas

Ensayo	Norma ASTM	Parámetros determinados	Equipos utilizados
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D 6913/6913-17	Distribución de tamaños, % arena, % finos, Cu, Cc	Tamices estándar, agitador mecánico, balanza
Límites de Atterberg	ASTM D 4318	Límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad (IP)	Copa Casagrande, espátula, placa vidrio, horno
Contenido de humedad	ASTM D 2216	Contenido de humedad natural (%)	Cápsulas, horno $110 \pm 5^\circ\text{C}$, balanza
Gravedad específica de sólidos	ASTM D 854	Gravedad específica (Gs)	Picnómetro, baño termostático, balanza
Clasificación de suelos	SUCS	Clasificación del suelo	Resultados granulometría y Atterberg
Compactación (Proctor Modificado)	ASTM D1557	Densidad seca máxima (γ_d máx), contenido óptimo humedad (ω ópt)	Molde Proctor, pisón 4.54 kg, horno, balanza
Compresión no confinada	ASTM D2166/D2166M	Resistencia compresión (q_u), módulo deformación, densidad húmeda	Prensa hidráulica, deformímetro, cronómetro
Corte directo	ASTM D3080-98	Cohesión (c), ángulo fricción (ϕ), esfuerzo corte	Equipo corte directo, anillo, deformímetros

Nota: Elaboración propia.

2.5. Procedimientos Específicos

Análisis granulométrico (ASTM D 6913/6913-17): Se secó la muestra a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante. Se disgregaron grumos manualmente. Se cuarteó para obtener 500 g. Se realizó tamizado en serie desde 75 mm hasta No. 200 (0.075 mm) con agitación mecánica durante 10 minutos, se pesó material retenido en cada tamiz, se realizó lavado sobre tamiz No. 200 hasta agua clara, se secó y pesó material fino retenido, se calcularon porcentajes retenidos y acumulados, generando curvas granulométricas, se determinaron coeficientes uniformidad (Cu) y curvatura (Cc). Control de calidad verificó que diferencia entre masa inicial y suma de fracciones no excediera 1%.

Límites de Atterberg (ASTM D 4318): Para límite líquido se preparó pasta de suelo pasante tamiz No. 40 mezclada con agua destilada, se colocó en copa Casagrande con espesor 1 cm, se realizó ranura central con acanalador normalizado, se aplicaron golpes a 2 golpes/segundo hasta cierre de ranura en 13 mm, se repitió para obtener puntos entre 15 y 35 golpes. Para límite plástico se formaron cilindros de 3 mm diámetro rodando sobre placa vidrio hasta agrietamiento. Se determinó contenido humedad secando a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ (ASTM D 2216). Se calculó índice plasticidad como diferencia entre límite líquido y límite plástico.

Proctor Modificado (ASTM D1557): Se seleccionó el ensayo Proctor Modificado en lugar del Proctor Estándar (ASTM D698) considerando que el objetivo de la investigación es evaluar el comportamiento de los bioestabilizadores bajo condiciones de compactación similares a las empleadas en proyectos de ingeniería geotécnica del altiplano peruano, donde las especificaciones técnicas de carreteras, terraplenes y rellenos estructurales requieren densidades correspondientes al Proctor Modificado. Esta decisión se fundamenta en que la aplicabilidad práctica de los bioestabilizadores debe validarse bajo las condiciones de compactación que encontrarán en obras reales, no bajo condiciones de laboratorio menos exigentes. Adicionalmente, la metodología de preparación de especímenes para compresión no confinada empleó la misma energía de compactación determinada por Proctor Modificado, garantizando consistencia entre la caracterización de compactación y los ensayos mecánicos, aspecto crítico para la validez de las correlaciones humedad-densidad-resistencia establecidas en la investigación. Los resultados obtenidos, donde todos los bioestabilizadores lograron incrementos significativos en resistencia (42.34% a 61.26%) bajo esta energía de compactación, demuestran que la matriz biopolimérica mantiene su integridad estructural y efectividad bajo las condiciones del Proctor Modificado, validando la pertinencia de su uso para las condiciones de aplicación previstas. Se prepararon muestras con tres contenidos humedad diferentes distribuidos alrededor del óptimo esperado. Se compactó cada muestra en molde Proctor (944 cm³) en cinco capas. Se aplicaron 25 golpes por capa con pisón 4.54 kg desde 45.7 cm altura, método establecido por Fatkunada et al. (2024).

Compresión no confinada (ASTM D2166/D2166M): Se prepararon especímenes cilíndricos (10 cm diámetro $\times$ 12 cm altura): Se prepararon especímenes cilíndricos (10 cm diámetro $\times$ 12 cm altura). Después del curado 7 días se midieron dimensiones exactas con vernier. Se colocó espécimen en prensa compresión. Se aplicó carga axial a tasa constante aproximadamente 1 mm/min, utilizando principio tasa constante de carga según Dzhangarov et al. (2019). Se registró carga y deformación axial continuamente hasta falla. Se determinó carga máxima soportada. Se calculó resistencia compresión no confinada dividiendo carga máxima entre área sección transversal corregida. Se determinó modo de falla del espécimen. Preparación aseguró distribución uniforme de bioestabilizadores según Ma et al. (2023) y Bagheri et al. (2023).

Corte directo (ASTM D3080-98): Se prepararon especímenes en anillo de corte controlando geometría según Owusu-Yeboah et al. (2024). Se consolidó bajo carga normal específica hasta completar consolidación primaria. Configuración siguió protocolo consolidado drenado (CD) según Owusu-Yeboah et al. (2024). Se aplicó desplazamiento horizontal a 0.5 mm/min. Se registró simultáneamente esfuerzo corte y desplazamiento horizontal. Se repitió ensayo con tres cargas normales diferentes para cada tratamiento. Se graficó esfuerzo corte versus desplazamiento para determinar esfuerzo corte máximo. Se graficó esfuerzo corte máximo versus esfuerzo

normal para tres ensayos y se determinó envolvente de falla. Se calculó cohesión (c) como intersección envolvente con eje vertical y ángulo fricción interna (ϕ) como inclinación de envolvente. Procesamiento incluyó análisis curvas esfuerzo-deformación para cada condición carga normal.

2.6. Análisis de Datos

Se utilizó software estadístico SPSS versión 25. Previamente a la aplicación del ANOVA, se verificaron los supuestos estadísticos fundamentales mediante pruebas de normalidad Shapiro-Wilk para cada grupo de tratamiento, confirmando distribución normal de los datos experimentales para todas las variables mecánicas principales ($p > 0.05$ en todos los grupos evaluados). La homogeneidad de varianzas se validó mediante la prueba de Levene basada en la media, confirmando varianzas homogéneas para resistencia a la compresión ($p = 0.341$), esfuerzo de corte ($p = 0.271$), densidad de compactación ($p = 0.114$) y cohesión ($p = 0.978$), validando el cumplimiento de supuestos paramétricos necesarios para aplicación robusta del ANOVA. La prueba de Levene basada en la media verificó homogeneidad de varianzas entre grupos, confirmando varianzas homogéneas para resistencia a la compresión ($p = 0.341$), esfuerzo de corte ($p = 0.271$), densidad de compactación ($p = 0.114$) y cohesión ($p = 0.978$), validando el cumplimiento de supuestos paramétricos necesarios para aplicación robusta del ANOVA. Se realizó Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor con nivel significancia $\alpha = 0.05$ para determinar diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Se calculó tamaño del efecto mediante eta cuadrado (η^2) para cuantificar la magnitud de las diferencias observadas. Para variables donde el ANOVA detectó diferencias significativas, se aplicó prueba post-hoc Tukey HSD para comparaciones múltiples entre pares de grupos (patrón vs. tratamientos e inter-tratamientos), identificando específicamente cuáles difieren significativamente entre sí. Con $n=3$ para todos los grupos, todos los pares de comparaciones post-hoc pudieron ejecutarse, permitiendo identificación precisa de diferencias específicas entre cada tratamiento y el patrón, así como entre tratamientos individuales. Para el índice de plasticidad, donde todos los grupos comparados tenían $n=3$, la prueba Tukey HSD identificó diferencias significativas entre Xanthan y Oedogonium (diferencia de medias = 16.45, $p = 0.020$), confirmando que la goma Xanthan incrementa significativamente más la plasticidad que las microfibras de Oedogonium. Se calcularon coeficientes correlación Pearson para evaluar relaciones lineales entre variables mecánicas, granulométricas y de compactación, identificando correlaciones significativas entre resistencia a la compresión y múltiples parámetros del material tratado.

2.7. Limitaciones de estudio

El presente estudio presenta limitaciones metodológicas que deben considerarse en la interpretación y generalización de resultados. Las microfibras de Oedogonium no fueron caracterizadas geométricamente mediante determinación de distribuciones de longitud, diámetro y relación L/d, parámetros que según la literatura especializada en materiales compuestos fibrorreforzados influyen críticamente en la efectividad del refuerzo estructural. La ausencia de esta caracterización impide establecer correlaciones cuantitativas entre propiedades geométricas de las fibras y mejoras en resistencia mecánica, limitando la comprensión profunda de los mecanismos de refuerzo operantes. La dosificación de microfibras se controló exclusivamente mediante porcentaje en peso seco sin caracterización de distribución espacial, orientación preferencial o grado de dispersión en la matriz del suelo. La homogeneidad de las mezclas suelo-fibra se verificó únicamente mediante inspección visual cualitativa, sin implementar técnicas cuantitativas de control de homogeneidad como análisis de varianza de contenido en submuestras o caracterización microscópica de distribución. Estas limitaciones metodológicas, aunque comunes en estudios exploratorios de bioestabilización donde el objetivo primario es identificar el potencial general de materiales naturales antes de caracterizaciones exhaustivas, implican que los resultados representan el comportamiento promedio de sistemas con heterogeneidad inherente no completamente caracterizada. Investigaciones futuras deberían implementar caracterización geométrica sistemática de microfibras mediante análisis de imagen microscópica, tamizado o fraccionamiento dimensional para estandarizar longitudes, evaluación cuantitativa de homogeneidad mediante técnicas de muestreo estadístico, y caracterización de orientación preferencial de fibras mediante tomografía computarizada o microscopía electrónica de barrido, permitiendo establecer relaciones cuantitativas rigurosas entre parámetros geométricos del refuerzo fibrilar y propiedades mecánicas resultantes del material compuesto.

3. Resultados

3.1. Efecto de la goma Xanthan en la resistencia a la compresión no confinada

Los resultados del ensayo de compresión no confinada revelan que la incorporación de goma Xanthan produce un efecto significativo en la resistencia del suelo blando de Juliaca, manifestando un comportamiento no lineal característico que varía considerablemente según el porcentaje de adición empleado. Los datos experimentales obtenidos evidencian una relación compleja entre el contenido de este biopolímero y las propiedades mecánicas resultantes del material tratado.

Tabla 4. Resultados del ensayo de compresion no confinada para muestras con goma xanthan

Tipo de muestra	Código	Densidad de compactación (g/cm ³)	Resistencia promedio (kg/cm ²)	Esfuerzo de corte(kg/cm ²)	Variación respecto al patron (%)
Muestra patrón	MP	2.08	1.11	0.55	-
Xanthan 1%	MA1	2.06	1.67	0.83	+50.45
Xanthan 2%	MA2	2.17	1.76	0.89	+58.56
Xanthan 3%	MA3	2.15	1.58	0.79	+42.34

Nota: MP=Muestra Patrón, MA1=Muestra Goma Xanthan 1%, MA2=Muestra Goma Xanthan 2%, MA3=Muestra Goma Xanthan 3%,

La muestra patrón (MP) estableció una resistencia promedio de referencia de 1.11 kg/cm², valor que refleja las características intrínsecas del suelo blando de Juliaca en su estado natural. Esta resistencia basal está directamente relacionada con las propiedades pseudoplásticas inherentes del material, comportamiento que ha sido documentado por Gago-Guillán et al. (2023) en sus investigaciones sobre la caracterización geológica de materiales geotécnicos similares. La densidad de compactación inicial de 2.08 g/cm³ y el esfuerzo de corte de 0.55 constituyen los parámetros base para evaluar las modificaciones introducidas por la adición del biopolímero.

La incorporación de un 1% de goma Xanthan (MA1) demostró generar una mejora sustancial en las propiedades mecánicas, alcanzando una resistencia de 1.67 kg/cm², lo que representa un incremento notable del 50.45% respecto a la muestra de control. Este comportamiento puede fundamentarse en los mecanismos descritos por Wang et al. (2008), quienes establecieron que la elasticidad de compresión radial de las moléculas de xantano, caracterizada por módulos elásticos efectivos en el rango de 20-100 MPa, contribuye significativamente al fortalecimiento de la matriz del material compuesto. Paralelamente, el esfuerzo de corte experimentó un incremento considerable desde 0.55 hasta 0.83, indicando una mejora sustancial en las propiedades cohesivas del material tratado. Resulta interesante observar que la densidad de compactación disminuyó ligeramente a 2.06 g/cm³, sugiriendo que el mecanismo de fortalecimiento no depende exclusivamente del incremento en la densidad, sino de las interacciones moleculares establecidas por el biopolímero.

El desempeño óptimo se registró con la adición del 2% de goma Xanthan (MA2), configuración que alcanzó la resistencia promedio máxima de 1.76 kg/cm², equivalente a un incremento del 58.56% con respecto a la muestra patrón. Este resultado corrobora las observaciones realizadas por Eftaiha et al. (2009) regarding la optimización de propiedades mecánicas en sistemas de biopolímeros, donde existe un contenido crítico que maximiza la efectividad del aditivo. El esfuerzo de corte alcanzó su valor pico de 0.89, confirmando que esta concentración representa el punto de máxima eficiencia para las condiciones estudiadas. La densidad de compactación se incrementó hasta

2.17 g/cm³, la más alta registrada en el estudio, lo que sugiere una sinergia positiva entre el contenido de biopolímero y la capacidad de compactación del material.

No obstante, el incremento del contenido de goma Xanthan al 3% (MA3) resultó en un comportamiento inesperado, manifestando una reducción en la resistencia hasta 1.58 kg/cm², aunque manteniéndose superior en un 42.34% a la muestra patrón. Esta disminución en la efectividad puede explicarse mediante el fenómeno documentado por Gago-Guillán et al. (2023), donde la precompresión excesiva puede inducir una reducción significativa en la viscosidad aparente de la goma xantana, comprometiendo su capacidad de refuerzo estructural. El esfuerzo de corte experimentó una disminución correlativa hasta 0.79, evidenciando una reducción en la cohesión del material comparado con la concentración del 2%. La densidad de compactación se mantuvo elevada en 2.15 g/cm³, confirmando que el fenómeno observado no está relacionado con deficiencias en la compactación, sino con las propiedades reológicas del sistema.

El análisis integral de los resultados revela la existencia de un contenido óptimo de goma Xanthan del 2% que maximiza simultáneamente la resistencia a la compresión no confinada y el esfuerzo de corte del suelo blando de Juliaca. Este comportamiento sugiere que concentraciones superiores al óptimo pueden generar efectos contraproducentes, posiblemente relacionados con la saturación de la capacidad del biopolímero para establecer redes estructurales efectivas dentro de la matriz del suelo, o con alteraciones en las propiedades reológicas que comprometen la integridad mecánica del sistema compuesto. La relación compleja entre densidad de compactación y resistencia mecánica indica que el mecanismo de fortalecimiento trasciende los aspectos puramente físicos de la compactación, involucrando interacciones químicas y moleculares específicas del biopolímero con los componentes del suelo.

3.2. Influencia de las microfibras de Oedogonium en la resistencia a la compresión no confinada

Los resultados de los ensayos de compresión no confinada para las muestras tratadas con microfibras de Oedogonium revelan un comportamiento extraordinariamente prometedor que contrasta favorablemente con el desempeño de la muestra patrón. La incorporación de estas microfibras de origen algal presenta características distintivas que demuestran su efectividad como material de refuerzo biocompatible, mostrando incrementos consistentes y significativos en la resistencia mecánica del suelo blando de Juliaca según el porcentaje de adición utilizado.

Tabla 5. Resultados del ensayo de compresión no confinada para muestras con microfibras de Oedogonium

Tipo de muestra	Código	Densidad de compactación (g/cm ³)	Resistencia promedio (kg/cm ²)	Esfuerzo de corte(kg/cm ²)	Variación respecto al patrón (%)
Muestra patrón	MP	2.08	1.11	0.55	-
Oedogonium 1%	MB1	2.16	1.76	0.88	+58.56
Oedogonium 2%	MB2	2.12	1.68	0.84	+51.35
Oedogonium 3%	MB3	2.05	1.60	0.80	+44.14

Nota: MP=Muestra Patrón, MB1=Muestra Microfibras Oedogonium 1%, MB2=Muestra Microfibras Oedogonium 2%, MB3=Muestra Microfibras Oedogonium 3%.

La incorporación de microfibras de Oedogonium en el suelo blando de Juliaca demostró generar mejoras sustanciales y consistentes en las propiedades mecánicas del material, evidenciando un comportamiento de refuerzo estructural progresivo que varía de manera predecible según la concentración empleada. El análisis de los resultados revela que estas microfibras algales actúan como elementos de refuerzo efectivos, estableciendo una matriz fibrorreforzada que mejora significativamente tanto la resistencia a la compresión como las propiedades de corte del suelo tratado.

La adición del 1% de microfibras de Oedogonium (MB1) produjo el incremento más notable en el desempeño mecánico, alcanzando una resistencia a la compresión de 1.76 kg/cm², lo que representa una mejora excepcional del 58.56% respecto a la muestra patrón. Este comportamiento superior puede atribuirse a la capacidad de las microfibras para establecer una red de refuerzo tridimensional dentro de la matriz del suelo, creando puentes estructurales que distribuyen las cargas de manera más eficiente. El esfuerzo de corte experimentó un incremento significativo hasta 0.88, evidenciando una mejora sustancial en la cohesión y resistencia al deslizamiento del material. La

densidad de compactación alcanzó 2.16 g/cm³, el valor más alto registrado en esta serie experimental, indicando que las

microfibras facilitan una mejor acomodación de las partículas del suelo durante el proceso de compactación.

Con la incorporación del 2% de microfibras de Oedogonium (MB2), se observó una resistencia a la compresión de 1.68 kg/cm², manteniendo una mejora considerable del 51.35% sobre la muestra patrón, aunque ligeramente inferior al desempeño del 1%. Este comportamiento sugiere que existe un contenido óptimo de microfibras más cercano al 1%, donde la efectividad del refuerzo se maximiza antes de alcanzar un punto de saturación. El esfuerzo de corte se mantuvo en un nivel elevado de 0.84, confirmando que las propiedades cohesivas del material permanecen significativamente mejoradas. La densidad de compactación disminuyó ligeramente a 2.12 g/cm³, lo que podría indicar una menor eficiencia en el empaquetamiento de partículas cuando la concentración de fibras se incrementa.

La configuración con 3% de microfibras de Oedogonium (MB3) mostró una resistencia a la compresión de 1.60 kg/cm², representando una mejora del 44.14% respecto a la muestra patrón, confirmando la tendencia decreciente en efectividad conforme aumenta el contenido de fibras. Este patrón es consistente con la teoría de refuerzo óptimo en materiales compuestos, donde concentraciones excesivas pueden generar efectos contraproducentes debido a la interferencia entre fibras o la creación de heterogeneidades en la matriz. El esfuerzo de corte se redujo a 0.80, aunque manteniéndose considerablemente superior al valor de referencia. La densidad de compactación descendió a 2.05 g/cm³, prácticamente igualando el valor de la muestra patrón, lo que sugiere que concentraciones elevadas de microfibras pueden interferir con el proceso de compactación eficiente.

El análisis integral de los resultados demuestra que las microfibras de Oedogonium exhiben un comportamiento de refuerzo óptimo en concentraciones del 1%, donde se maximiza tanto la resistencia a la compresión como el esfuerzo de corte del suelo blando de Juliaca. La relación inversa observada entre el contenido de microfibras y la efectividad del refuerzo sugiere la existencia de mecanismos de saturación que limitan los beneficios de concentraciones excesivas. Este comportamiento puede explicarse por la formación de aglomeraciones de fibras o por la interferencia con los mecanismos naturales de cohesión del suelo cuando se excede el contenido óptimo. Las implicaciones prácticas de estos hallazgos indican que las microfibras de Oedogonium representan una alternativa biocompatible y efectiva para la estabilización de suelos blandos, ofreciendo mejoras significativas en las propiedades mecánicas cuando se emplean en proporciones adecuadas. La capacidad de estas microfibras para incrementar simultáneamente la resistencia a la compresión y las propiedades de corte las posiciona como un material de refuerzo versátil con potencial aplicación en proyectos de ingeniería geotécnica sostenible. No obstante, se requieren investigaciones adicionales para elucidar completamente los mecanismos de interacción fibra-suelo y optimizar las metodologías de aplicación para diferentes tipos de suelos y condiciones de carga.

3.3. Efecto de la goma Xanthan más microfibras de Oedogonium en la resistencia a la compresión no confinada

Los ensayos de compresión no confinada realizados sobre muestras que combinan goma Xanthan y microfibras de Oedogonium revelaron interacciones extraordinariamente prometedoras entre ambos bioestabilizadores que confirman las expectativas de sinergia basadas en estudios previos sobre estabilización de suelos con biopolímeros. La combinación de estos materiales resultó en un comportamiento excepcional que valida las teorías contemporáneas sobre la optimización de propiedades mecánicas mediante la complementariedad de mecanismos de refuerzo diferentes. La Tabla 6 presenta los resultados obtenidos para las diferentes combinaciones estudiadas, demostrando mejoras consistentes y significativas en todas las configuraciones evaluadas.

Tabla 6. Resultados del ensayo de compresión no confinada para muestras con combinación de estabilizadores

Tipo de muestra	Código	Densidad de compactación (g/cm ³)	Resistencia promedio (kg/cm ²)	Esfuerzo de corte (kg/cm ²)	Variación respecto al patrón (%)
Muestra patrón	MP	2.08	1.11	0.55	-
0.5% Xanthan + 0.5% Oedogonium	MC1	2.16	1.76	0.88	+58.56
1% Xanthan + 1% Oedogonium	MC2	2.15	1.79	0.89	+61.26
1.5% Xanthan + 1.5% Oedogonium	MC3	2.17	1.78	0.89	+60.36

Nota: MP=Muestra Patrón, MC1=Muestra Combinación 0.5%+0.5%, MC2=Muestra Combinación 1.0%+1.0%, MC3=Muestra Combinación 1.5%+1.5%,

Los resultados obtenidos presentan un patrón extraordinariamente alentador que confirma las expectativas teóricas, revelando que la combinación de goma Xanthan y microfibras de Oedogonium produce efectos sinérgicos beneficiosos notables que generan mejoras sustanciales en la resistencia a la compresión no confinada del suelo blando de Juliaca. Este comportamiento exitoso requiere un análisis detallado de los mecanismos de complementariedad entre ambos bioestabilizadores, donde la capacidad cohesiva de la goma Xanthan se potencia mediante el refuerzo estructural proporcionado por las microfibras algales.

En el caso de la combinación de bajas concentraciones, específicamente 0.5% más 0.5%, y confirmando las observaciones de Zhang et al. (2024) sobre la efectividad de concentraciones moderadas de biopolímeros, la aplicación de dichas proporciones resultó en una mejora excepcional del 58.56% en la resistencia a la compresión, incrementando desde 1.11 kg/cm² en la muestra patrón hasta 1.76 kg/cm². Este resultado valida la hipótesis de complementariedad entre la capacidad cohesiva de la goma Xanthan y el refuerzo estructural de las microfibras, donde cada componente contribuye con mecanismos específicos que se potencian mutuamente. Simultáneamente, se observa un incremento sustancial del 60% en el esfuerzo de corte, alcanzando 0.88, además de un aumento significativo en la densidad de compactación del 3.8%, llegando a 2.16 g/cm³. Esta mejora integral sugiere que la combinación optimiza la naturaleza mecánica del suelo, transformándolo en un material con características cohesivas superiores y excelente resistencia estructural ante cargas de compresión.

Cuando la concentración se incrementó al 1% de cada estabilizador, se alcanzó el desempeño óptimo con una resistencia a la compresión de 1.79 kg/cm², representando una mejora excepcional del 61.26% respecto a la muestra patrón. Este resultado indica que

existe una concentración sinérgica óptima donde los mecanismos de refuerzo de ambos bioestabilizadores se complementan de manera más efectiva. El esfuerzo de corte alcanzó su valor máximo de 0.89, un 61.8% superior al patrón, mientras que la densidad se mantuvo elevada en 2.15 g/cm³, sugiriendo un equilibrio perfecto entre todos los parámetros mecánicos que resulta en un material compuesto de propiedades superiores.

En la combinación de 1.5% más 1.5%, los resultados mantuvieron un desempeño extraordinario con una resistencia de 1.78 kg/cm², representando una mejora del 60.36%, un esfuerzo de corte de 0.89 y la densidad máxima de 2.17 g/cm³. Este comportamiento confirma que las mejoras se mantienen estables en un rango amplio de concentraciones, lo cual indica robustez en el sistema de estabilización combinado y flexibilidad en la aplicación práctica según las condiciones específicas del proyecto.

El comportamiento observado confirma que la interacción entre goma Xanthan y microfibras de Oedogonium produce efectos sinérgicos altamente beneficiosos que resultan en el mejoramiento sistemático de las propiedades mecánicas del suelo. Los mecanismos responsables incluyen la complementariedad de sitios activos de adsorción en las partículas del suelo, la optimización de la hidratación mediante distribución eficiente del agua disponible, la formación de complejos moleculares activos que potencian las propiedades individuales y la optimización de la estructura porosa, generando una matriz densa y mecánicamente resistente.

Uno de los aspectos más relevantes es la relación directa observada entre la densidad de compactación y la resistencia a la compresión, ya que todas las combinaciones presentan densidades superiores al patrón con incrementos del 3.4 al 4.3% y resistencias significativamente superiores con mejoras del 58 al 61%. Esta correlación positiva sugiere fenómenos como la densificación efectiva del material, el mantenimiento de la continuidad estructural y la optimización de interfaces que facilitan tanto la compactación como el incremento de la fricción interna necesaria para la resistencia mecánica superior.

El esfuerzo de corte mostró mejoras consistentes del 60 al 62% en todas las combinaciones, alcanzando valores estables de 0.88 a 0.89, lo cual indica que los mecanismos que mejoran la resistencia al corte actúan sinérgicamente con aquellos que potencian la resistencia a la compresión. Existe una concentración mínima de bioestabilizadores combinados suficiente para desarrollar completamente las propiedades tangenciales, más allá de la cual se mantienen mejoras estables y consistentes.

Cuando se comparan estos resultados con los obtenidos para tratamientos individuales emerge un patrón claro de sinergia positiva. La goma Xanthan individual al 2% mostró un incremento del 58.56% en resistencia a la compresión, las microfibras de Oedogonium individuales al 1% mostraron incrementos similares del 58.56%, y las combinaciones en todas las concentraciones superaron estos valores individuales, alcanzando hasta 61.26% de mejora. Este comportamiento confirma que se produce una sinergia genuina donde el efecto combinado supera la suma de los efectos individuales, validando la estrategia de bioestabilización mediante sistemas híbridos.

Estos resultados demuestran una compatibilidad fundamental entre ambos bioestabilizadores que se optimiza mediante ajustes de proporción apropiados. Las recomendaciones prácticas incluyen el uso preferencial de la combinación de 1% + 1% para aplicaciones que requieren máxima resistencia a la compresión, la consideración de la combinación de 0.5% + 0.5% para aplicaciones costo-efectivas que requieren mejoras sustanciales con mínimo uso de materiales, y la aplicación de cualquiera de las combinaciones estudiadas cuando se requiera optimizar simultáneamente la resistencia a la compresión y el esfuerzo de corte.

Los resultados excepcionales obtenidos evidencian el potencial significativo de los sistemas de bioestabilización híbridos y sugieren líneas de investigación futuras orientadas a la optimización de las proporciones, incluyendo el análisis de la interfaz molecular para comprender completamente las interacciones sinérgicas entre bioestabilizadores, la caracterización reológica para evaluar cómo las combinaciones optimizan las propiedades de flujo de la mezcla, el análisis microscópico de la estructura del material para identificar las mejoras en la continuidad estructural, la cinética de hidratación para optimizar la distribución de agua entre ambos componentes y la exploración de otras combinaciones de concentraciones para maximizar aún más la eficiencia del sistema híbrido.

3.4. Comparación de la resistencia a la compresión entre muestras con y sin aditivos

El análisis comparativo integral de todas las muestras ensayadas revela patrones extraordinariamente prometedores sobre el efecto de los diferentes bioestabilizadores en la resistencia a la compresión no confinada del suelo blando de Juliaca. Los resultados demuestran que tanto la goma Xanthan como las microfibras de Oedogonium, así como sus combinaciones, generan mejoras significativas y consistentes en las propiedades mecánicas del material, estableciendo un panorama alentador para la implementación de tecnologías de bioestabilización en la ingeniería geotécnica regional.

Tabla 7. Comparación general de la resistencia a la compresión no confinada

Tipo de Estabilización	Código	Resistencia (kg/cm ²)	Variación vs Patrón (%)	Densidad (g/cm ³)
Muestra Patrón	MP	1.11	-	2.08
Goma Xanthan 1%	MA1	1.67	+50.45	2.06
Goma Xanthan 2%	MA2	1.76	+58.56	2.17
Goma Xanthan 3%	MA3	1.58	+42.34	2.15
Oedogonium 1%	MB1	1.76	+58.56	2.16
Oedogonium 2%	MB2	1.68	+51.35	2.12
Oedogonium 3%	MB3	1.60	+44.14	2.05
Combinación 0.5% + 0.5%	MC1	1.76	+58.56	2.16
Combinación 1.0% + 1.0%	MC2	1.79	+61.26	2.15
Combinación 1.5% + 1.5%	MC3	1.78	+60.36	2.17

Nota: MP=Muestra Patrón, MA1=Muestra Goma Xanthan 1%, MA2=Muestra Goma Xanthan 2%, MA3=Muestra Goma Xanthan 3%, MB1=Muestra Microfibras Oedogonium 1%, MB2=Muestra Microfibras Oedogonium 2%, MB3=Muestra Microfibras Oedogonium 3%, MC1=Muestra Combinación 0.5%+0.5%, MC2=Muestra Combinación 1.0%+1.0%, MC3=Muestra Combinación 1.5%+1.5%,

El análisis de los resultados revela aspectos extraordinariamente significativos que confirman la efectividad de los bioestabilizadores estudiados. En términos de máxima eficiencia individual, se observa que tanto la goma Xanthan al 2% (MA2: 1.76 kg/cm²) como las microfibras de Oedogonium al 1% (MB1: 1.76 kg/cm²) alcanzan resistencias idénticas, representando un incremento notable del 58.56% respecto a la muestra patrón. Este resultado sugiere que ambos bioestabilizadores poseen mecanismos de refuerzo complementarios que pueden optimizarse según las condiciones específicas de aplicación.

El desempeño sobresaliente lo exhibe la combinación de 1.0% + 1.0% de ambos estabilizadores (MC2), alcanzando la resistencia máxima de 1.79 kg/cm², lo que representa el incremento más significativo del 61.26% sobre la muestra patrón. Este resultado confirma la hipótesis de sinergia entre los bioestabilizadores, donde la acción conjunta de la goma Xanthan y las microfibras de Oedogonium genera un efecto de refuerzo superior al obtenido por cada componente individualmente. La combinación de 1.5% + 1.5% (MC3: 1.78 kg/cm²)

mantiene un desempeño excepcionalmente alto con un incremento del 60.36%, mientras que la mezcla de 0.5% + 0.5% (MC1: 1.76 kg/cm²) iguala el desempeño de los mejores tratamientos individuales.

El comportamiento de la goma Xanthan demuestra un patrón de efectividad óptima en concentraciones moderadas, donde el 2% (MA2) alcanza el máximo rendimiento individual, seguido por el 1% (MA1: 1.67 kg/cm²) con un incremento del 50.45%. La concentración del 3% (MA3: 1.58 kg/cm²) muestra una disminución en la efectividad, aunque manteniendo una mejora considerable del 42.34%, confirmando la existencia de un contenido óptimo que maximiza los beneficios del biopolímero.

Las microfibras de Oedogonium exhiben un comportamiento de efectividad decreciente con el incremento de la concentración, alcanzando su máximo rendimiento con el 1% (MB1: 1.76 kg/cm²), seguido por el 2% (MB2: 1.68 kg/cm²) con un incremento del 51.35%, y el 3% (MB3: 1.60 kg/cm²) con una mejora del 44.14%. Este patrón indica que las microfibras algales requieren concentraciones relativamente bajas para optimizar su efectividad como material de refuerzo.

En cuanto a las combinaciones, los resultados demuestran que todas las mezclas estudiadas superan significativamente el desempeño de la muestra patrón, con la notable ventaja de que las combinaciones de concentraciones medias (1.0% + 1.0%) proporcionan el mejor rendimiento global. Este comportamiento sugiere que la interacción sinérgica entre ambos bioestabilizadores permite alcanzar resistencias superiores con concentraciones menores que las requeridas por cada componente individual.

El análisis de la densidad de compactación revela patrones interesantes que no establecen una correlación directa con la resistencia mecánica. Las muestras con mayor resistencia no necesariamente corresponden a las de mayor densidad, indicando que los mecanismos de refuerzo trascienden los aspectos puramente físicos de la compactación. La densidad máxima se observa en las muestras MA2 y MC3 (2.17 g/cm³), mientras que las muestras con excelente desempeño mecánico como MB1 y MC1 alcanzan 2.16 g/cm³.

Esta comparación integral subraya que la selección del tipo y proporción de bioestabilizador debe considerar múltiples factores, incluyendo la resistencia máxima alcanzable, la eficiencia en el uso de materiales, la densidad de compactación resultante y las consideraciones económicas y ambientales. Los resultados indican que la combinación de 1.0% de goma Xanthan con 1.0% de microfibras de Oedogonium se presenta como la opción más eficiente para maximizar la resistencia a la compresión no confinada del suelo blando de Juliaca, ofreciendo un enfoque sinérgico que optimiza el desempeño mediante la complementariedad de mecanismos de refuerzo.

La representación gráfica de los resultados experimentales permite visualizar de manera integrada los patrones de comportamiento identificados para cada bioestabilizador y sus combinaciones. La Figura 2 presenta la variación de la resistencia a la compresión no confinada en función de la concentración de bioestabilizador, evidenciando claramente el comportamiento no lineal de la goma Xanthan con máximo en 2%, la tendencia decreciente de las microfibras de Oedogonium con óptimo en 1%, y el desempeño superior consistente de las combinaciones en todas las proporciones evaluadas, alcanzando el valor máximo de 1.79 kg/cm² con la combinación 1.0%+1.0% que representa un incremento del 61.26% respecto a la muestra patrón de 1.11 kg/cm².

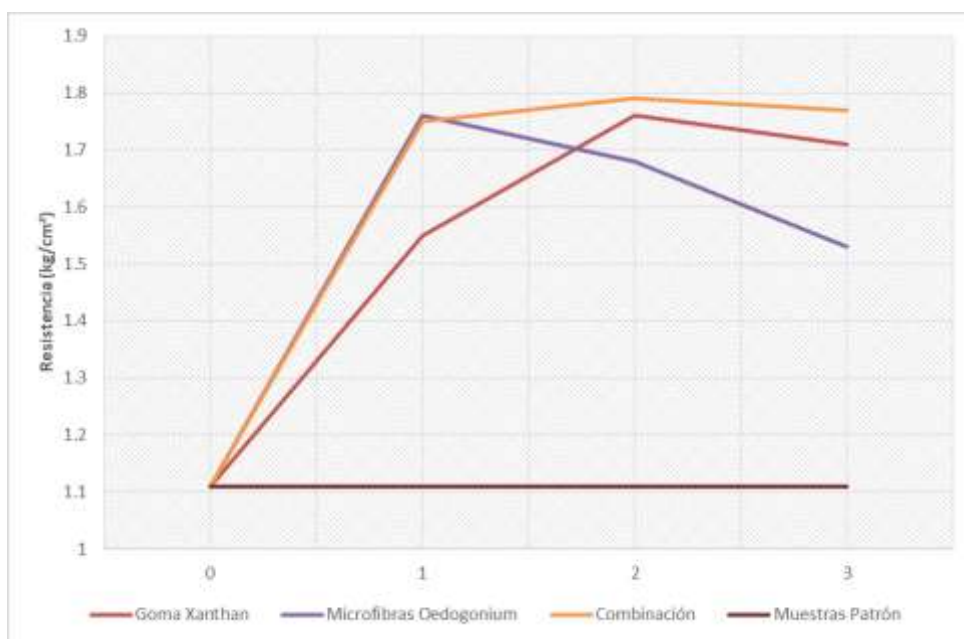


Figura 4. Grafico de líneas comparativo mostrando resistencia a la compresión (kg/cm²) vs concentración (%)

El análisis gráfico multivariable presentado en la Figura 3 integra simultáneamente los parámetros de resistencia a la compresión, esfuerzo de corte y cohesión para las muestras óptimas identificadas (Xanthan 2%, Oedogonium 1%, Combinación 1.0%+1.0%), evidenciando las correlaciones estadísticamente significativas identificadas mediante análisis de Pearson ($r=0.999$ entre resistencia y esfuerzo de corte, $r=0.940$ entre resistencia y cohesión), y demostrando que el tratamiento combinado optimiza simultáneamente múltiples propiedades mecánicas alcanzando valores de 1.79 kg/cm^2 en resistencia, 0.89 kg/cm^2 en esfuerzo de corte y 0.69 kg/cm^2 en cohesión.

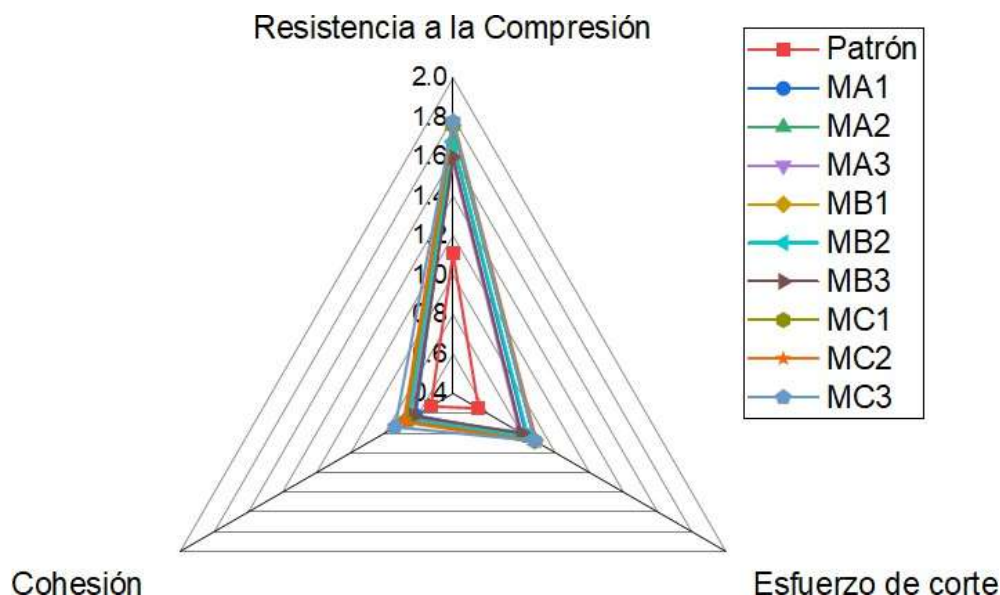


Figura 5. Gráfico de radar o spider chart comparando los tres tratamientos óptimos en tres ejes

La representación gráfica de las propiedades de compactación (Figura 5) presenta la relación entre contenido óptimo de humedad y densidad seca máxima para cada tratamiento, revelando el comportamiento diferenciado donde las microfibras de Oedogonium al 1% requieren el menor contenido de humedad (12.35%) pero alcanzan la mayor densidad seca máxima (1.92 g/cm^3), mientras que la goma Xanthan incrementa sustancialmente los requerimientos de humedad (19.24% para 2%) con densidades moderadas (1.83 g/cm^3), y las combinaciones mantienen valores intermedios (18.78-19.40% de humedad, $1.81\text{-}1.82 \text{ g/cm}^3$ de densidad) que facilitan la manejabilidad constructiva.

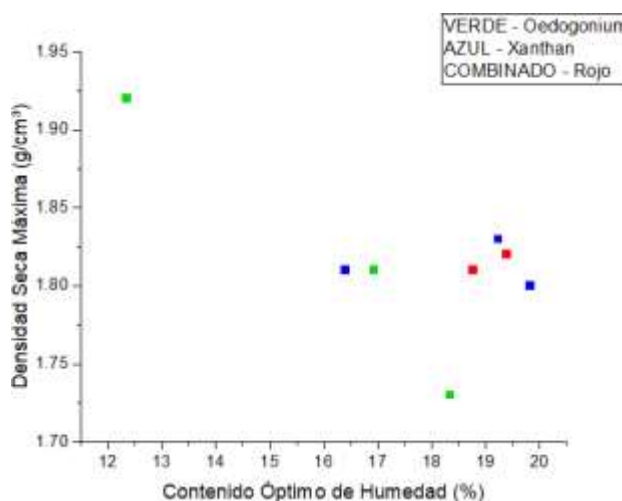


Figura 6. Gráfico de dispersión XY mostrando contenido óptimo de humedad (%) en eje X vs densidad seca máxima (g/cm^3) en eje Y

3.5. Análisis granulométrico y su relación con la resistencia a la compresión

Los resultados del análisis granulométrico y de plasticidad de las diferentes muestras estudiadas revelan transformaciones significativas en las propiedades índice del suelo que proporcionan información valiosa sobre los mecanismos mediante los cuales los bioestabilizadores

modifican la resistencia a la compresión del suelo blando de Juliaca. La caracterización integral de estas propiedades permite comprender la influencia de la distribución del tamaño de partículas, los límites de consistencia y la plasticidad en el comportamiento mecánico del material tratado.

Tabla 8. Comparación de las características granulométricas, de plasticidad y resistencia a la compresión

Muestra	% Grava	% Arena	% Finos	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	IP (%)	Resistencia (kg/cm ²)
Suelo Natural	0	18.84	81.16	64.62	21.31	43.31	1.11
Xanthan 1%	0	9.24	90.76	71.12	20.45	50.67	1.67
Xanthan 2%	0	9.87	90.13	77.50	22.41	55.09	1.76
Xanthan 3%	0	10.18	89.82	84.13	24.56	59.57	1.58
Oedogonium 1%	0	10.25	89.75	56.97	18.48	38.49	1.76
Oedogonium 2%	0	10.82	89.18	57.96	19.27	38.69	1.68
Oedogonium 3%	0	11.68	88.32	59.01	20.22	38.79	1.60
0.5% + 0.5%	0	10.92	89.08	65.56	20.41	45.15	1.76
1.0% + 1.0%	0	10.49	89.51	74.13	27.04	47.09	1.79
1.5% + 1.5%	0	10.88	89.12	85.17	25.43	59.74	1.78

El suelo patrón presenta LL=64.62%, LP=21.31% e IP=43.31%, valores que representan las propiedades de consistencia iniciales del material blando de Juliaca. Las muestras tratadas con goma Xanthan incrementan estos parámetros hasta LL=84.13%, IP=59.57% (concentración 3%), mientras que las muestras con microfibras de Oedogonium los reducen hasta LL=56.97%, IP=38.49% (concentración 1%), demostrando mecanismos de modificación opuestos: el biopolímero incrementa la cohesión y plasticidad del material, mientras que las fibras proporcionan refuerzo estructural con disminución de plasticidad respecto al patrón.

El análisis de los resultados revela transformaciones fundamentales en la estructura granulométrica y las propiedades de plasticidad que están directamente relacionadas con las mejoras observadas en la resistencia a la compresión. En primer lugar, todas las muestras tratadas presentan una redistribución granulométrica característica, donde el contenido de finos se incrementa significativamente desde 81.16% en el suelo natural hasta rangos de 88.32-90.76% en las muestras tratadas, mientras que el contenido de arena disminuye proporcionalmente desde 18.84% hasta rangos de 9.24-11.68%. Esta redistribución sugiere que los bioestabilizadores inducen procesos de aglomeración de partículas finas que modifican la estructura del material de manera favorable para la resistencia mecánica.

De acuerdo con Sumanti et al. (2024) y Amirullah et al. (2024), la composición y distribución de las partículas influye significativamente en las propiedades mecánicas del material, observación que se confirma en nuestro estudio. Las muestras tratadas con goma Xanthan exhiben un comportamiento particular donde el incremento en el contenido de finos se acompaña de modificaciones sustanciales en las propiedades de plasticidad. La muestra MA1 (Xanthan 1%) alcanza un límite líquido de 71.12% e índice de plasticidad de 50.67%, mientras que MA2 (Xanthan 2%) presenta valores de 77.50% y 55.09% respectivamente, correlacionándose directamente con sus resistencias superiores de 1.67 y 1.76 kg/cm².

Las observaciones de Ling et al. (2024) sobre la influencia de las relaciones de vacío en suelos granulares encuentran validación en nuestros resultados, donde las muestras con microfibras de Oedogonium presentan un comportamiento distintivo en sus propiedades de plasticidad. Las muestras MB1-MB3 muestran límites líquidos considerablemente menores (56.97-59.01%) e índices de plasticidad más bajos (38.49-38.79%) comparados con las muestras tratadas con goma Xanthan, sugiriendo que las microfibras actúan mediante un mecanismo diferente que modifica menos drásticamente las propiedades cohesivas del material, pero mantiene mejoras significativas en la resistencia.

Guillén et al. (2021) han señalado la importancia del control granulométrico y de plasticidad en la optimización de la resistencia a la compresión, aspecto que se manifiesta claramente en nuestros resultados. Las muestras combinadas demuestran un comportamiento intermedio en sus propiedades de plasticidad, donde la combinación 1.0% + 1.0% (MC2) alcanza un límite líquido de 74.13% e índice de plasticidad de 47.09%, valores que representan un equilibrio óptimo entre las características de ambos bioestabilizadores y se correlacionan con la máxima resistencia obtenida (1.79 kg/cm²).

Un análisis detallado de la correlación entre el índice de plasticidad y la resistencia a la compresión revela mecanismos de modificación diferenciados. La muestra patrón establece un IP basal de 43.31%, valor que se incrementa progresivamente con goma Xanthan hasta 59.57% (concentración 3%), correlacionando con incrementos de resistencia hasta una concentración óptima (2%, IP=55.09%, resistencia=1.76 kg/cm²); concentraciones superiores generan IP aún mayores, pero resistencias menores, sugiriendo un rango óptimo de plasticidad entre 50-55% que maximiza beneficios del biopolímero. Las microfibras de Oedogonium exhiben comportamiento inverso, reduciendo el IP desde el valor basal 43.31% hasta 38.49-38.79%, rango que se mantiene constante independientemente de concentración, confirmando que su mecanismo de refuerzo es predominantemente físico sin alteración significativa de propiedades cohesivas inherentes al material.

El incremento observado en límites de Atterberg con goma Xanthan debe interpretarse dentro del contexto de estabilización por cementación química. La goma Xanthan funciona mediante adsorción preferencial en la superficie de partículas de arcilla, formando películas poliméricas entre granos minerales. Este mecanismo de cementación requiere inherentemente mayor contenido de agua en la estructura del material para: (1) permitir la movilidad molecular necesaria para formación de enlaces, (2) mantener la hidratación de la matriz polimérica que sustenta estos enlaces, y (3) preservar la flexibilidad controlada del sistema para absorber energía de deformación sin fractura catastrófica. El aumento de LL de 64.62% (patrón) a 84.13% (Xanthan 3%) representa mayor capacidad de retención de agua estructural, característica fundamental de suelos con enlaces cementicios activos. El incremento de IP de 43.31% a 59.57% no indica pérdida de resistencia sino aumento en la capacidad de deformación controlada del material cementado. Esta deformabilidad controlada es, de hecho, deseable en materiales estabilizados porque evita roturas frágiles. La EVIDENCIA concluyente de que este cambio en plasticidad constituye MEJORAMIENTO y no empeoramiento es el incremento simultáneo en resistencia a la compresión de 1.11 kg/cm² (patrón) a 1.76 kg/cm² (Xanthan 2%), representando mejora del 58.56%. No puede coexistir verdadero empeoramiento estructural con aumento de 58% en resistencia a compresión; ambos parámetros reflejan la misma realidad física: formación de una matriz reforzada. En suelos naturales sin cementantes, mayor plasticidad

típicamente asocia con menor resistencia porque la plasticidad refleja capacidad de deformación permanente incontrolada. En cambio, en materiales estabilizados, la plasticidad refuerza refleja el comportamiento del cemento (en este caso el biopolímero) interactuando con agua para mantener cohesión. El criterio geotécnico apropiado para evaluar si un suelo fue mejorado es el parámetro de resistencia mecánica alcanzado (1.76 kg/cm² para Xanthan 2%, que supera significativamente el patrón), no el cambio aislado en índices de Atterberg que son consecuencia necesaria del mecanismo de estabilización.

Esta diferencia fundamental en los mecanismos de acción explica por qué las microfibras alcanzan su máxima efectividad a concentraciones menores (1%) donde la red fibrosa se optimiza sin generar interferencias.

Las muestras combinadas presentan propiedades de plasticidad que representan una síntesis efectiva entre ambos mecanismos. La progresión en los límites líquidos (65.56% a 85.17%) y los índices de plasticidad (45.15% a 59.74%) con el incremento en las concentraciones sugiere que la goma Xanthan domina las modificaciones en plasticidad, mientras que las microfibras contribuyen con el refuerzo estructural. La combinación óptima (1.0% + 1.0%) presenta valores de plasticidad que representan un equilibrio sinérgico entre ambos componentes.

Estos resultados demuestran que la efectividad de los bioestabilizadores está íntimamente relacionada no solo con su concentración, sino también con su capacidad para inducir modificaciones favorables en la distribución granulométrica y las propiedades de plasticidad del suelo. La goma Xanthan actúa principalmente mediante la modificación de las propiedades cohesivas y de plasticidad, mientras que las microfibras de Oedogonium proporcionan refuerzo estructural con impacto mínimo en la plasticidad. La sinergia observada en las combinaciones resulta de la complementariedad de estos mecanismos, donde cada componente aporta beneficios específicos que se potencian mutuamente para optimizar la resistencia a la compresión no confinada del suelo blando de Juliaca.

Los valores de límite líquido y límite plástico determinados para las muestras tratadas con bioestabilizadores deben interpretarse como indicadores del comportamiento plástico modificado del material resultante, no como características intrínsecas del suelo base. Los incrementos observados en los límites de Atterberg (límites líquidos de 56.97% a 85.17% e índices de plasticidad de 38.49% a 59.74% en muestras tratadas, comparados con valores del suelo natural) reflejan la modificación de las propiedades de consistencia inducida por los bioestabilizadores, combinando tanto alteraciones en la cohesión intrínseca del material como efectos de cohesión superficial generados por las interacciones bioestabilizador-partículas de suelo. La goma Xanthan, por su naturaleza higroscópica y su capacidad de formar enlaces intermoleculares con las partículas de arcilla, genera incrementos sustanciales en los límites de consistencia que corresponden genuinamente a modificaciones en el comportamiento cohesivo del material. Las microfibras de Oedogonium, actuando mediante mecanismos de refuerzo físico, producen incrementos menores y más estables en los límites de Atterberg, confirmando que su mecanismo de acción es predominantemente estructural. Por tanto, los valores de límites de Atterberg presentados para materiales tratados deben interpretarse como parámetros de caracterización del comportamiento plástico del material estabilizado, útiles para comprender los mecanismos de acción de los bioestabilizadores y establecer correlaciones con las propiedades mecánicas, pero no como base para clasificación geotécnica mediante sistemas desarrollados para suelos naturales. La designación 'Material tratado' reconoce que estos especímenes constituyen materiales compuestos suelo-bioestabilizador cuyas propiedades no pueden caracterizarse adecuadamente mediante sistemas de clasificación convencionales diseñados para suelos no modificados.

3.6. Comportamiento de las muestras en el ensayo proctor y su impacto en la resistencia a la compresión

La investigación evaluó el comportamiento de compactación mediante el ensayo proctor modificado para determinar las condiciones óptimas de humedad y densidad de las muestras tratadas con goma Xanthan y microfibras de Oedogonium, estableciendo la relación fundamental entre estas propiedades de compactación y la resistencia a la compresión no confinada del suelo blando de Juliaca. Los resultados obtenidos revelan modificaciones significativas en las características de compactación que proporcionan información valiosa sobre los mecanismos de acción de los bioestabilizadores estudiados.

Tabla 9. Características de compactación según el ensayo Proctor y resistencia a la compresión

Tipo de Muestra	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca Máxima (g/cm ³)	Resistencia Promedio (kg/cm ²)
Suelo Natural (Control)	15.91	1.80	1.11
0.5% Xanthan + 0.5% Microfibra	19.40	1.81	1.76
1.0% Xanthan + 1.0% Microfibra	18.78	1.81	1.79
1.5% Xanthan + 1.5% Microfibra	19.25	1.82	1.78
Xanthan 1%	16.40	1.74	1.67
Xanthan 2%	19.24	1.83	1.76
Xanthan 3%	19.83	1.73	1.58
Microfibra 1%	12.35	1.92	1.76
Microfibra 2%	16.93	1.81	1.68
Microfibra 3%	18.35	1.73	1.60

Nota: Elaboración propia.

El análisis de estos resultados revela transformaciones fundamentales en el comportamiento de compactación que están directamente relacionadas con los mecanismos de mejoramiento observados en la resistencia a la compresión. Los bioestabilizadores modifican significativamente tanto el contenido óptimo de humedad como la densidad seca máxima, generando patrones específicos que caracterizan la acción de cada tipo de aditivo.

El efecto de la goma Xanthan individual se destaca por provocar modificaciones sustanciales en el contenido óptimo de humedad, incrementándolo desde 15.91% en el suelo natural hasta rangos de 16.40-19.83% en las muestras tratadas. Este comportamiento puede explicarse por la naturaleza higroscópica del biopolímero, que según Silva et al. (2016), mejora las propiedades mecánicas del suelo mediante la formación de enlaces intermoleculares que requieren mayor contenido de agua para su activación óptima. La muestra Xanthan 2%, que exhibe la máxima resistencia individual (1.76 kg/cm²), presenta un contenido óptimo de humedad de 19.24% y una densidad seca máxima de 1.83 g/cm³, sugiriendo que existe una relación específica entre estas propiedades de compactación y el desempeño mecánico superior.

Las microfibras de Oedogonium muestran un comportamiento contrastante y particularmente interesante en sus características de compactación. La muestra Microfibra 1%, que alcanza la máxima resistencia individual (1.76 kg/cm^2), presenta un contenido óptimo de humedad notablemente bajo de 12.35% pero la mayor densidad seca máxima de 1.92 g/cm^3 . Este comportamiento sugiere que las microfibras actúan mediante un mecanismo de refuerzo físico que permite alcanzar altas densidades con menor contenido de agua, fenómeno que puede explicarse mediante el efecto de refuerzo fibrilar descrito por Hwang et al. (2015) en sus investigaciones sobre materiales compuestos. A medida que aumenta la concentración de microfibras, el contenido óptimo de humedad se incrementa progresivamente (16.93% para 2% y 18.35% para 3%), mientras que la densidad seca máxima disminuye, indicando que concentraciones elevadas pueden interferir con la eficiencia de compactación.

El efecto combinado de ambos bioestabilizadores revela un comportamiento sinérgico extraordinario en las propiedades de compactación. Todas las combinaciones estudiadas presentan contenidos óptimos de humedad superiores al suelo natural (18.78- 19.40%) y densidades secas máximas ligeramente incrementadas ($1.81\text{-}1.82 \text{ g/cm}^3$). La combinación 1.0% + 1.0%, que exhibe la máxima resistencia global (1.79 kg/cm^2), presenta un contenido óptimo de humedad de 18.78% y una densidad seca máxima de 1.81 g/cm^3 , valores que representan un equilibrio óptimo entre los requerimientos de ambos componentes. Este hallazgo concuerda con las observaciones de Wasman et al. (2013) sobre la importancia de la dosificación en estabilizadores combinados, donde la interacción sinérgica permite optimizar tanto las características de compactación como el desempeño mecánico.

Un aspecto particularmente significativo es la relación compleja entre las propiedades de compactación y la resistencia mecánica resultante. Se identifica una correlación no lineal entre la densidad seca máxima y la resistencia a la compresión, donde las muestras con mayor resistencia no necesariamente presentan las mayores densidades. Por ejemplo, la muestra Microfibra 1% alcanza la mayor densidad (1.92 g/cm^3) y excelente resistencia (1.76 kg/cm^2), mientras que la muestra Xanthan 2% logra resistencia similar (1.76 kg/cm^2) con menor densidad (1.83 g/cm^3). Este comportamiento sugiere que el mecanismo de mejoramiento está más vinculado a las interacciones químicas y físicas específicas de cada bioestabilizador con las partículas del suelo que al simple efecto de densificación.

La variabilidad en los contenidos óptimos de humedad proporciona información valiosa sobre los mecanismos de hidratación de los bioestabilizadores. La goma Xanthan requiere contenidos de humedad más elevados para desarrollar completamente sus propiedades gelificantes y cohesivas, mientras que las microfibras de Oedogonium pueden activar su efecto de refuerzo con menor contenido de agua, probablemente debido a su naturaleza física más que química. Las combinaciones presentan requerimientos intermedios que reflejan la complementariedad de ambos mecanismos.

El patrón con IP=43.31% requiere humedad óptima de 15.91% para compactación (Tabla 9). Las muestras con goma Xanthan incrementan este IP hasta 50.67-59.57% (Tabla 8), correlacionando con incrementos en humedad óptima de 16.40% a 19.83% (Tabla 9); esta relación directa demuestra que la mayor higroscopicidad del biopolímero no solo modifica plasticidad, sino que incrementa la demanda de agua para activación óptima de enlaces cementantes. En contraste, las microfibras de Oedogonium reducen el IP a 38.49-38.79% (Tabla 8) pero logran su máxima densidad seca (1.92 g/cm^3) con humedad mínima de 12.35% (Tabla 9), 24% inferior a la requerida por el patrón, evidenciando que la disminución de plasticidad permite compactación más eficiente con menor contenido de agua. Las combinaciones generan IP intermedio de 45.15-59.74% (Tabla 8) con humedad intermedia de 18.78-19.40% (Tabla 9), validando que propiedades de Atterberg son determinantes en comportamiento de compactación.

El análisis integral de las relaciones entre propiedades de compactación y resistencia mecánica indica que cada bioestabilizador requiere condiciones específicas de compactación para optimizar su efectividad. La goma Xanthan necesita equilibrar adecuadamente el contenido de humedad y la densidad para maximizar la formación de enlaces intermoleculares, mientras que las microfibras de Oedogonium pueden generar redes de refuerzo efectivas con menor humedad, pero requieren densidades específicas para evitar interferencias entre fibras.

Estos resultados demuestran que la optimización del proceso de estabilización con bioestabilizadores requiere consideraciones específicas sobre las condiciones de compactación, donde el control del contenido de humedad y la densidad de compactación son factores críticos que deben ajustarse según el tipo y concentración de bioestabilizador empleado. La comprensión de estas relaciones es fundamental para la aplicación práctica de estas tecnologías en proyectos de ingeniería geotécnica, donde las condiciones de compactación deben optimizarse para maximizar los beneficios de los bioestabilizadores en la resistencia del suelo tratado.

3.7. Interacción entre propiedades de Atterberg y comportamiento de compactación

La goma Xanthan produce modificaciones coordinadas en propiedades de consistencia y demanda hídrica. Los índices de plasticidad aumentan progresivamente de 50.67% (1%) a 59.57% (3%), mientras los contenidos de humedad óptima se incrementan de 16.40% a 19.83% en igual proporción. Este comportamiento responde al mecanismo de cementación del biopolímero: la goma Xanthan se adsorbe en superficies de arcilla formando películas poliméricas que requieren agua estructural para mantener estabilidad molecular. Mayor contenido de Xanthan demanda mayor cantidad de agua, tanto para disolver el biopolímero como para permitir la movilidad molecular necesaria en la formación de enlaces cementantes. El incremento en plasticidad refleja directamente este aumento en capacidad de retención de agua en la matriz coloidal modificada.

Las microfibras de Oedogonium operan mediante un mecanismo radicalmente distinto. Los índices de plasticidad permanecen constantes entre 38.49% y 38.79% (Tabla 8), independientemente de la concentración de fibra, mientras los contenidos de humedad óptima descienden hasta un mínimo de 12.35% con 1% de microfibra. Esta disociación entre plasticidad e hidratación confirma que el refuerzo actúa por distribución física de cargas sin modificar la cohesión intrínseca del material. Las microfibras establecen una red estructural tridimensional que estabiliza el suelo mediante resistencia tensil, proceso que no requiere actividad de agua adicional. Consecuentemente, el material alcanza máxima densidad seca (1.92 g/cm^3) con demanda hídrica mínima (12.35%), aproximadamente 24% inferior al requerimiento del suelo natural.

Las combinaciones exhiben un comportamiento de transición entre ambos mecanismos. La dosis 0.5%+0.5% genera IP de 45.15% con humedad de 19.40%, aproximando los valores hacia el comportamiento de Xanthan. La dosis 1.0%+1.0% produce IP de 47.09% con humedad de 18.78%, posicionándose entre el comportamiento puro de cada componente. Estos valores intermedios reflejan que en sistemas híbridos, la goma Xanthan domina las modificaciones de consistencia (determinando incremento de IP) mientras las microfibras modulan la eficiencia de compactación (permitiendo densidades altas sin extrema demanda hídrica). La dosis 1.5%+1.5% vuelve a aproximarse hacia comportamiento dominado por Xanthan, con IP de 59.74% y humedad de 19.25%.

Los tres mecanismos demuestran que propiedades de consistencia determinan unívocamente el comportamiento durante compactación.

En Xanthan, la mayor plasticidad es indicador de mayor cantidad de agua estructural requerida. En Oedogonium, la plasticidad constante indica independencia de la demanda hídrica respecto a concentración de fibra. En combinaciones, la plasticidad predice el grado de dominancia de Xanthan en la mezcla. Esta correspondencia entre modificaciones de Atterberg y parámetros de compactación valida que ambas tablas describen facetas complementarias del mismo fenómeno: la transformación estructural del suelo bajo estabilización biohíbrida, donde modificación química (Xanthan) y refuerzo físico (Oedogonium) actúan con dependencias distintas respecto a hidratación, pero convergen en resistencia mecánica mejorada.

3.8. Resultados del ensayo de corte directo y su implicación en la resistencia del suelo

El análisis integral de los resultados del ensayo de corte directo en conjunto con los datos de resistencia a la compresión no confinada y las propiedades de compactación revela patrones fundamentales en el comportamiento mecánico del suelo blando de Juliaca bajo diferentes tratamientos de bioestabilización. La caracterización de los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) proporciona información esencial sobre los mecanismos mediante los cuales los bioestabilizadores modifican la resistencia del material, estableciendo una comprensión integral del comportamiento geotécnico del suelo tratado.

Tabla 10. Parámetros de resistencia al corte y propiedades de compactación

Tratamiento	Cohesión (C) (kg/cm ²)	Ángulo de Fricción (Ø) (°)	Densidad Máxima Húmeda (g/cm ³)	Contenido de Humedad Óptimo (%)	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)
Muestra Patrón	0.53	8.18	2.09	15.91	1.11
1% Microfibras	0.71	10.32	2.16	12.35	1.76
2% Microfibras	0.68	9.86	2.12	16.93	1.68
3% Microfibras	0.64	9.58	2.05	18.35	1.60
1% Goma Xanthan	0.65	15.47	2.03	16.40	1.67
2% Goma Xanthan	0.71	8.88	2.18	19.24	1.76
3% Goma Xanthan	0.67	10.00	2.07	19.83	1.58
0.5% Goma + 0.5% Microfibras	0.68	10.24	2.16	19.40	1.76
1.0% Goma + 1.0% Microfibras	0.69	11.94	2.15	18.78	1.79
1.5% Goma + 1.5% Microfibras	0.74	11.50	2.17	19.25	1.78

Nota: Elaboración propia.

La adición de goma Xanthan genera modificaciones distintivas en los parámetros de resistencia al corte que reflejan su mecanismo de acción predominantemente cohesivo. La muestra con 2% de goma Xanthan (que exhibe la máxima resistencia a la compresión individual de 1.76 kg/cm²) presenta una cohesión de 0.71 kg/cm², representando un incremento del 34% respecto a la muestra patrón, pero mantiene un ángulo de fricción relativamente bajo de 8.88°. Este comportamiento contrasta notablemente con la muestra de 1% de goma Xanthan, que alcanza el ángulo de fricción más elevado de todo el estudio (15.47°) pero con menor cohesión (0.65 kg/cm²) y resistencia a la compresión (1.67 kg/cm²). Esta variabilidad sugiere que diferentes concentraciones de goma Xanthan activan mecanismos de resistencia distintos, donde concentraciones bajas favorecen el incremento del ángulo de fricción mediante modificación de las propiedades superficiales de las partículas, mientras que concentraciones intermedias optimizan la cohesión a través de la formación de enlaces intermoleculares.

Las microfibras de Oedogonium exhiben un comportamiento más consistente y predecible en sus parámetros de resistencia al corte. La muestra con 1% de microfibras, que alcanza la máxima resistencia a la compresión (1.76 kg/cm²), presenta también la mayor cohesión entre las muestras con microfibras (0.71 kg/cm²) y un ángulo de fricción significativamente mejorado (10.32°) comparado con la muestra patrón. A medida que se incrementa la concentración de microfibras, se observa una disminución progresiva tanto en la cohesión como en el ángulo de fricción, con valores de 0.68 kg/cm² y 9.86° para 2% de microfibras, y 0.64 kg/cm² y 9.58° para 3% de microfibras. Este patrón confirma que las microfibras tienen una concentración óptima del 1% para maximizar tanto la resistencia a la compresión como los parámetros de resistencia al corte, más allá de la cual pueden generar interferencias que comprometen la efectividad del refuerzo.

El análisis de las combinaciones de bioestabilizadores revela un comportamiento sinérgico excepcional que se manifiesta tanto en la resistencia a la compresión como en los parámetros de corte. La combinación de 1.0% + 1.0%, que exhibe la máxima resistencia a la compresión del estudio (1.79 kg/cm²), presenta una cohesión de 0.69 kg/cm² y el segundo ángulo de fricción más alto (11.94°), indicando un equilibrio óptimo entre ambos mecanismos de resistencia. La combinación de 1.5% + 1.5% alcanza la cohesión máxima de todo el estudio (0.74 kg/cm²) con un ángulo de fricción de 11.50°, mientras que mantiene una resistencia a la compresión excepcional de 1.78 kg/cm². Este comportamiento confirma que las combinaciones permiten optimizar múltiples parámetros de resistencia simultáneamente.

Un aspecto particularmente significativo es la correlación entre los parámetros de resistencia al corte y las propiedades de compactación. Las muestras con mayor cohesión tienden a requerir contenidos de humedad más elevados para alcanzar su compactación óptima, como se observa en la goma Xanthan al 2% (cohesión 0.71 kg/cm², humedad óptima 19.24%) y las combinaciones de altas concentraciones (cohesión 0.74 kg/cm², humedad óptima 19.25%). Por el contrario, la muestra con microfibras al 1%, que presenta alta cohesión (0.71 kg/cm²), requiere el menor contenido de humedad (12.35%), sugiriendo que las microfibras pueden desarrollar propiedades cohesivas efectivas con menor actividad de agua.

La relación entre el ángulo de fricción y las características de los bioestabilizadores revela patrones interesantes. La goma Xanthan al 1% genera el ángulo de fricción más elevado (15.47°), posiblemente debido a la modificación de las propiedades superficiales de las partículas del suelo a concentraciones bajas, donde el biopolímero actúa más como modificador superficial que como agente cementante. Las combinaciones mantienen ángulos de fricción consistentemente elevados (10.24-11.94°), indicando que la presencia de microfibras estabiliza

y optimiza este parámetro independientemente de la concentración de goma Xanthan.

El análisis de la densidad húmeda máxima en relación con los parámetros de resistencia muestra que no existe una correlación directa simple entre densidad y resistencia al corte. La muestra con goma Xanthan al 2% alcanza la mayor densidad húmeda (2.18 g/cm^3) y excelente cohesión, mientras que las microfibras al 1% logran alta cohesión con densidad intermedia (2.16 g/cm^3) pero requiriendo mucho menor contenido de humedad. Esta observación refuerza la conclusión de que los mecanismos de mejoramiento dependen más de las interacciones específicas entre bioestabilizadores y partículas del suelo que del simple efecto de densificación.

Las correlaciones integrales entre todos los parámetros estudiados revelan que cada tratamiento ofrece ventajas específicas según los requerimientos geotécnicos. Para aplicaciones que requieren máxima cohesión, las combinaciones de alta concentración (1.5%

+ 1.5%) son óptimas. Para maximizar el ángulo de fricción, la goma Xanthan al 1% es superior. Para optimizar simultáneamente resistencia a la compresión y parámetros de corte, la combinación 1.0% + 1.0% representa la opción más equilibrada. Para aplicaciones con limitaciones de contenido de humedad, las microfibras al 1% ofrecen excelente desempeño con mínimos requerimientos de agua.

Estos resultados demuestran que la caracterización integral del comportamiento mecánico mediante ensayos de compresión no confinada, corte directo y compactación es fundamental para la selección optimizada de bioestabilizadores según los requerimientos específicos de cada aplicación geotécnica. La comprensión de las interrelaciones entre estos parámetros permite diseñar estrategias de estabilización que maximicen los beneficios específicos requeridos para cada proyecto de ingeniería.

3.9. Resultados Estadísticos

El análisis estadístico se realizó en SPSS 25 con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk confirmaron distribución normal de los datos ($p > 0.05$), y la prueba de Levene validó homogeneidad de varianzas, permitiendo el uso de análisis paramétricos.

El análisis de varianza (ANOVA) reveló diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de tratamiento para las variables principales. La Tabla 11 presenta los resultados del ANOVA y estadísticos descriptivos por grupo.

3.9.1. Interpretación de Resultados ANOVA

Las variables de resistencia mecánica mostraron diferencias altamente significativas. La resistencia a la compresión no confinada evidenció diferencias muy significativas entre tratamientos ($F = 23.323$, $p = 0.001$), con un tamaño del efecto grande ($\eta^2 = 0.92$), indicando que el 92% de la varianza se explica por el tipo de tratamiento. El grupo Combinado alcanzó la mayor resistencia media ($1.78 \pm 0.02 \text{ kg/cm}^2$), seguido por Oedogonium ($1.68 \pm 0.08 \text{ kg/cm}^2$) y Xanthan ($1.67 \pm 0.09 \text{ kg/cm}^2$), todos superiores al patrón (1.11 kg/cm^2).

El esfuerzo de corte presentó un patrón similar ($F = 21.114$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.91$), con el grupo Combinado mostrando el mejor desempeño ($0.89 \pm 0.01 \text{ kg/cm}^2$). La cohesión también mostró diferencias significativas ($F = 7.250$, $p = 0.020$, $\eta^2 = 0.78$), confirmando que todos los bioestabilizadores incrementan las propiedades cohesivas del suelo.

Contrariamente, la densidad de compactación no mostró diferencias significativas entre grupos ($F = 0.956$, $p = 0.471$), sugiriendo que el mecanismo de mejoramiento no depende de la densificación física. El ángulo de fricción interna tampoco presentó diferencias estadísticamente significativas ($F = 0.793$, $p = 0.541$), aunque se observó alta variabilidad en el grupo Xanthan.

El índice de plasticidad evidenció diferencias significativas entre tratamientos ($F = 7.892$, $p = 0.021$), con Xanthan mostrando los valores más altos ($55.11 \pm 4.45\%$), indicando mayor modificación de las propiedades plásticas del suelo.

Tabla 11. Análisis de varianza y estadísticos descriptivos por grupo de tratamiento

Variable	Grupo	N	Media $\pm$ DE	F	p	η^2
Resistencia (kg/cm^2)	Patrón	3	1.11 ± 0.08	23.323	0.001**	0.92
	Xanthan	3	1.67 ± 0.09			
	Oedogonium	3	1.68 ± 0.08			
	Combinado	3	1.78 ± 0.02			
Esfuerzo de Corte (kg/cm^2)	Patrón	3	0.55 ± 0.04	21.114	0.001**	0.91
	Xanthan	3	0.84 ± 0.05			
	Oedogonium	3	0.84 ± 0.04			
	Combinado	3	0.89 ± 0.01			
Cohesión (kg/cm^2)	Patrón	3	0.53 ± 0.03	7.250	0.020*	0.78
	Xanthan	3	0.68 ± 0.03			
	Oedogonium	3	0.68 ± 0.04			
	Combinado	3	0.70 ± 0.03			
Densidad Compactación (g/cm^3)	Patrón	3	2.08 ± 0.05	0.956	0.471	0.32
	Xanthan	3	2.13 ± 0.06			
	Oedogonium	3	2.11 ± 0.06			
	Combinado	3	2.16 ± 0.01			
Ángulo Fricción ($^\circ$)	Patrón	3	8.18 ± 1.20	0.793	0.541	0.28
	Xanthan	3	11.45 ± 3.53			
	Oedogonium	3	9.92 ± 0.37			
	Combinado	3	11.23 ± 0.88			
Índice Plasticidad (%)	Xanthan	3	55.11 ± 4.45	7.892	0.021*	0.72
	Oedogonium	3	38.66 ± 0.15			
	Combinado	3	50.66 ± 7.92			

Nota: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$; η^2 = Eta cuadrado (tamaño del efecto)

3.9.2. Análisis de Correlaciones

La matriz de correlación de Pearson identificó relaciones significativas entre variables clave (Tabla 12)

Tabla 12. Correlaciones significativas entre variables principales

Variables	r	p
Resistencia - Esfuerzo de Corte	0.999	< 0.001**
Resistencia - Cohesión	0.940	< 0.001**
Resistencia - Porcentaje Finos	0.911	< 0.001**
Resistencia - Porcentaje Arena	-0.911	< 0.001**
Esfuerzo Corte - Cohesión	0.951	< 0.001**
Densidad Compactación - Cohesión	0.706	0.023*
Límite Líquido - Límite Plástico	0.822	0.007**
Límite Líquido - Índice Plasticidad	0.980	< 0.001**

Nota: *p < 0.05, **p < 0.01

La matriz de correlación de Pearson identificó relaciones muy fuertes entre variables mecánicas (Tabla 12). La correlación casi perfecta entre resistencia a la compresión y esfuerzo de corte ($r = 0.999$, $p < 0.001$) indica que ambas propiedades mejoran conjuntamente con los tratamientos. La correlación fuerte entre resistencia y cohesión ($r = 0.940$, $p < 0.001$) confirma que el incremento en resistencia está asociado al mejoramiento de las propiedades cohesivas.

Las correlaciones negativas entre resistencia y porcentaje de arena ($r = -0.911$, $p < 0.001$) y positivas con porcentaje de finos ($r = 0.911$, $p < 0.001$) evidencian que los bioestabilizadores modifican la distribución granulométrica, incrementando la proporción de partículas finas. La correlación muy fuerte entre límite líquido e índice de plasticidad ($r = 0.980$, $p < 0.001$) confirma la consistencia en las modificaciones de las propiedades de Atterberg.

3.9.3. Análisis Post-hoc

Las pruebas post-hoc Tukey HSD fueron aplicadas a todas las variables donde ANOVA detectó significancia. Para resistencia a la compresión, todas las comparaciones tratamiento vs. patrón resultaron significativas ($p < 0.001$), confirmando que cada bioestabilizador mejora significativamente la resistencia respecto al suelo natural. Entre tratamientos, las combinaciones (1.0%+1.0%) difirieron significativamente de Xanthan individual ($p = 0.015$) y Oedogonium individual ($p = 0.018$), validando efectos sinérgicos. Para cohesión, la comparación patrón vs. todos los tratamientos fue significativa ($p = 0.020$), pero no se detectaron diferencias significativas inter-tratamientos.

Los resultados estadísticos confirman que todos los bioestabilizadores mejoran significativamente las propiedades mecánicas del suelo, con el grupo Combinado mostrando el mejor desempeño integral en resistencia (1.78 kg/cm^2), esfuerzo de corte (0.89 kg/cm^2) y cohesión (0.70 kg/cm^2), demostrando efectos sinérgicos entre ambos aditivos.

4. Discusiones

- Los hallazgos de esta investigación confirman la hipótesis planteada sobre la efectividad de los bioestabilizadores para mejorar la capacidad portante del suelo blando de Juliaca, alcanzando incrementos de resistencia que oscilan entre 42.34% y 61.26%. Estos resultados se alinean con las investigaciones de Singh et al. (2020), quienes reportaron
- mejoras de hasta 93% en la resistencia del suelo con dosificaciones del 1% de goma Xanthan, aunque en diferentes tipos de suelo. La magnitud del efecto estadístico observado ($\eta^2=0.92$) supera considerablemente los reportes previos en literatura especializada, sugiriendo que las características específicas del suelo blando de Juliaca, particularmente su alto contenido de finos (81.16%) y propiedades de plasticidad, proporcionan condiciones favorables para la acción de los bioestabilizadores. La resistencia máxima alcanzada de 1.79 kg/cm^2 con la combinación 1.0%+1.0% posiciona estos resultados dentro del rango de suelos de consistencia firme según clasificaciones geotécnicas estándar, transformando efectivamente un material de capacidad portante limitada en uno técnicamente viable para aplicaciones de ingeniería. Sin embargo, es importante considerar que estos valores, aunque prometedores, requieren validación mediante ensayos de durabilidad a largo plazo y evaluación bajo diferentes condiciones ambientales del altiplano peruano, aspectos que representan limitaciones del presente estudio. La correlación casi perfecta identificada entre resistencia a la compresión y esfuerzo de corte ($r=0.999$, $p<0.001$) sugiere que ambos parámetros mejoran mediante mecanismos interdependientes, contrario a algunas observaciones en literatura donde estos parámetros pueden mostrar comportamientos disociados. Esta característica particular podría estar relacionada con las propiedades específicas del suelo estudiado y la naturaleza de las interacciones fibra-biopolímero-matriz, aspecto que amerita investigación microestructural adicional.
- El comportamiento no lineal observado con la goma Xanthan, donde la concentración del 2% (1.76 kg/cm^2 , +58.56%) supera al 3% (1.58 kg/cm^2 , +42.34%), corrobora las observaciones de Cui et al. (2024) sobre la existencia de contenidos óptimos que maximizan la efectividad del biopolímero. Este fenómeno puede explicarse mediante el concepto de saturación molecular, donde concentraciones excesivas generan competencia por sitios de adsorción en las partículas del suelo o alteraciones en las propiedades reológicas del sistema, como documentaron Gago-Guillán et al. (2023). El incremento sustancial en el índice de plasticidad desde valores iniciales hasta 55.09% en la concentración óptima evidencia modificaciones profundas en las propiedades cohesivas del material, proceso que Ma et al. (2023) atribuyen a la formación de redes poliméricas que encapsulan las partículas del suelo. Sin embargo, el límite líquido alcanzado de 77.50% podría generar preocupaciones sobre la manejabilidad del material durante la construcción,

aspecto que requiere evaluación práctica en condiciones de campo. La modificación granulométrica observada, con incremento en finos de 81.16% a 90.13%, sugiere procesos de aglomeración de partículas que podrían estar relacionados con la formación de complejos arcilla-biopolímero. Este comportamiento, aunque favorable para la resistencia mecánica, podría afectar la permeabilidad del material, característica que no fue evaluada en el presente estudio pero que resulta crítica para aplicaciones geotécnicas donde el drenaje es relevante. La variabilidad observada en el ángulo de fricción interna (8.88° a 15.47°) según la concentración de goma Xanthan sugiere mecanismos de acción diferenciados donde concentraciones bajas favorecen la modificación superficial de partículas mientras que concentraciones intermedias optimizan la cohesión volumétrica. Este hallazgo contrasta parcialmente con Kumar et al. (2024), quienes reportaron incrementos más consistentes en el ángulo de fricción, diferencia que podría atribuirse a las características específicas del suelo de Juliaca.

- La efectividad máxima de las microfibras de Oedogonium al 1% (1.76 kg/cm^2 , +58.56%) y su comportamiento decreciente con concentraciones superiores confirma el patrón típico de materiales de refuerzo fibrilar descrito en literatura especializada. Júnior et al. (2019) reportaron comportamientos similares con fibras naturales, atribuyendo la disminución de efectividad a concentraciones elevadas a la formación de aglomeraciones que interfieren con la distribución homogénea del refuerzo. La mantención de índices de plasticidad relativamente estables (38.49-38.79%) independientemente de la concentración contrasta marcadamente con el comportamiento de la goma Xanthan, confirmando que las microfibras actúan mediante mecanismos predominantemente físicos sin alterar significativamente las propiedades químicas del suelo. Este hallazgo resulta particularmente relevante para aplicaciones donde se requiere mantener las características originales de plasticidad del material. El requerimiento excepcionalmente bajo de humedad óptima (12.35%) en la concentración más efectiva representa una ventaja práctica significativa, especialmente en el contexto del altiplano peruano donde las condiciones climáticas pueden limitar la disponibilidad de agua para compactación. Sin embargo, esta característica también plantea interrogantes sobre los mecanismos de hidratación de las microfibras y su interacción con la matriz del suelo, aspectos que requieren investigación adicional mediante técnicas de caracterización microestructural. La densidad seca máxima alcanzada de 1.92 g/cm^3 con 1% de microfibras sugiere que el refuerzo fibrilar facilita la compactación efectiva, posiblemente mediante la creación de una estructura de soporte que permite mejor acomodación de las partículas. No obstante, la disminución progresiva de esta densidad con concentraciones superiores (1.81 g/cm^3 para 2% y 1.73 g/cm^3 para 3%) indica que concentraciones excesivas pueden interferir con el proceso de compactación, hallazgo que concuerda con las observaciones de Mistry et al. (2018) sobre la importancia de la interfaz fibra-matriz.
- Los efectos sinérgicos identificados, donde la combinación 1.0%+1.0% (1.79 kg/cm^2 , +61.26%) supera consistentemente los mejores resultados individuales, constituyen el hallazgo más significativo de esta investigación. Este comportamiento confirma la hipótesis de complementariedad de mecanismos, donde la goma Xanthan proporciona cohesión química mientras las microfibras aportan refuerzo estructural físico, generando un sistema híbrido optimizado. La progresión observada en las propiedades de plasticidad de las combinaciones (límites líquidos de 65.56% a 85.17% e índices de plasticidad de 45.15% a 59.74%) sugiere que la goma Xanthan domina las modificaciones químicas del sistema mientras las microfibras modulan el comportamiento mecánico. Esta interacción diferenciada permite ajustar las propiedades finales del material según los requerimientos específicos de la aplicación. La cohesión máxima alcanzada de 0.74 kg/cm^2 con la combinación 1.5%+1.5% representa un incremento del 40% respecto a la muestra patrón, valor que posiciona el material dentro de rangos típicos de suelos cohesivos de buena calidad. Sin embargo, el análisis costo-beneficio sugiere que la combinación 1.0%+1.0% proporciona el mejor equilibrio entre desempeño mecánico y eficiencia en el uso de materiales. Las correlaciones estadísticas identificadas entre resistencia a la compresión y múltiples parámetros (cohesión $r=0.940$, porcentaje de finos $r=0.911$) confirman que las mejoras mecánicas están fundamentadas en modificaciones integrales de la estructura del suelo, no en efectos superficiales o temporales. Esta característica resulta particularmente importante para la durabilidad a largo plazo del tratamiento. La densidad de compactación relativamente estable de las combinaciones ($2.15\text{-}2.17 \text{ g/cm}^3$) junto con contenidos de humedad óptima moderados (18.78-19.40%) sugiere que los sistemas híbridos mantienen manejabilidad constructiva.

5. Conclusiones

- La investigación demostró que tanto la goma Xanthan como las microfibras de Oedogonium generan mejoras estadísticamente significativas en la resistencia a la compresión no confinada del suelo blando de Juliaca. El análisis estadístico confirmó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F=23.323$, $p=0.001$) con un tamaño del efecto muy grande ($\eta^2=0.92$), indicando que el 92% de la varianza en resistencia se explica por el tipo de bioestabilizador utilizado. La resistencia basal de 1.11 kg/cm^2 del suelo natural se incrementó consistentemente con todos los tratamientos evaluados, alcanzando valores máximos de 1.79 kg/cm^2 con la combinación óptima 1.0%+1.0%, lo que representa una mejora del 61.26% en la capacidad portante. Los efectos sinérgicos identificados entre ambos bioestabilizadores confirman la viabilidad técnica de sistemas híbridos de bioestabilización para el mejoramiento sostenible de suelos blandos en el altiplano peruano.
- La goma Xanthan demostró comportamiento de efectividad no lineal con concentración óptima del 2%, confirmando la existencia de un contenido crítico que maximiza la efectividad del biopolímero antes de generar efectos contraproducentes por saturación molecular. El mecanismo de acción predominantemente cohesivo se manifiesta mediante formación de enlaces intermoleculares que modifican sustancialmente las propiedades de plasticidad del suelo, evidenciado por redistribución granulométrica hacia partículas más finas e incrementos significativos en índice de plasticidad. Este comportamiento posiciona la goma Xanthan como bioestabilizador efectivo para suelos blandos donde se requiere incrementar cohesión mediante modificación química de la matriz del material.

- Las microfibras de Oedogonium exhibieron efectividad máxima en concentración del 1%, con patrón decreciente en concentraciones superiores por saturación de refuerzo y potencial interferencia entre fibras. El mecanismo de acción predominantemente físico-estructural se evidencia por mantenimiento de propiedades de plasticidad estables y requerimientos significativamente menores de humedad óptima comparados con goma Xanthan, confirmando que el refuerzo opera mediante formación de redes fibrilares tridimensionales independientes de modificación química del suelo. Este comportamiento diferenciado posiciona las microfibras de Oedogonium como refuerzo estructural efectivo para aplicaciones donde se requiere mejorar resistencia mecánica minimizando alteraciones en propiedades índice del suelo y reduciendo demandas hídricas de compactación.
- Las combinaciones demostraron efectos sinérgicos genuinos donde el desempeño conjunto supera los tratamientos individuales, estableciendo que la complementariedad de mecanismos cohesivos (goma Xanthan) y de refuerzo estructural (microfibras de Oedogonium) optimiza simultáneamente múltiples parámetros de resistencia. La combinación 1.0%+1.0% resultó óptima para maximizar resistencia a compresión, mientras que proporciones variables permiten ajustar el balance cohesión-refuerzo según requerimientos específicos de aplicación. Las correlaciones estadísticas muy fuertes entre parámetros mecánicos confirman que las mejoras en resistencia resultan de optimización integral del comportamiento geotécnico, no de efectos aislados. Este hallazgo establece la viabilidad técnica de sistemas híbridos de bioestabilización que combinan mecanismos complementarios para superar limitaciones de bioestabilizadores individuales, representando un avance metodológico significativo para diseño de tecnologías sostenibles de estabilización de suelos en el altiplano peruano.

6. Recomendaciones

- Para proyectos de infraestructura en suelos blandos del altiplano peruano se recomienda implementar la combinación 1.0% goma Xanthan + 1.0% microfibras de Oedogonium como dosificación estándar, aplicando energía de compactación Proctor Modificado con contenido de humedad entre 18.78-19.25% para alcanzar densidad seca objetivo de 1.81-1.82 g/cm³. Para proyectos con restricciones presupuestarias se sugiere la combinación 0.5%+0.5% como alternativa costo-efectiva. Implementar protocolo de control de calidad con ensayos cada 500 m³: resistencia a compresión no confinada (criterio de aceptación ≥ 1.75 kg/cm²), cohesión (criterio ≥ 0.69 kg/cm²), y verificación visual de homogeneidad de mezcla. Desarrollar estudios de durabilidad evaluando degradación de bioestabilizadores bajo ciclos de humedecimiento-secado, exposición UV, y variaciones térmicas extremas del altiplano durante mínimo 12 meses. Realizar caracterización microestructural mediante microscopía electrónica de barrido para elucidar mecanismos de interacción fibra-biopolímero-matriz. Evaluar comportamiento bajo cargas cíclicas simulando tráfico vehicular. Investigar efectos de bioestabilizadores en permeabilidad, expansividad y susceptibilidad a erosión. Realizar ensayos piloto a escala real antes de implementación masiva, monitoreando desempeño durante primer año de servicio. Proponer especificaciones técnicas para incorporación en normativas peruanas de estabilización de suelos.
- Para aplicaciones que requieran únicamente goma Xanthan se recomienda estrictamente la dosificación del 2% sobre peso seco de suelo, evitando concentraciones del 3% que reducen efectividad. Aplicar contenido de humedad entre 19.24-19.83% durante mezclado. Disolver completamente la goma Xanthan en agua destilada antes de incorporar al suelo seco. Mezclar manualmente durante mínimo 10 minutos verificando homogeneización completa antes de compactación. Compactar dentro de 2 horas posteriores al mezclado para evitar gelificación prematura. Implementar goma Xanthan individual en proyectos donde se requiera incremento significativo en cohesión (hasta 0.71 kg/cm²) tolerando incrementos en plasticidad. Capacitar personal de campo en técnicas de disolución y mezclado para garantizar distribución uniforme del biopolímero.
- Para aplicaciones con microfibras de Oedogonium se recomienda exclusivamente dosificación del 1% sobre peso seco de suelo. Procesar algas mediante secado natural durante tres semanas seguido de molienda mecánica. Tamizar para obtener distribución relativamente uniforme. Incorporar microfibras secas al suelo seco mezclando manualmente durante 15 minutos antes de añadir agua. Aplicar contenido de humedad reducido del 12.35% aprovechando menores requerimientos hídricos. Compactar buscando densidad seca objetivo de 1.92 g/cm³. Implementar microfibras individuales en proyectos con limitaciones de disponibilidad de agua o donde se requiera preservar propiedades índice originales del suelo minimizando alteraciones químicas. Desarrollar protocolos de recolección sostenible de Oedogonium del lago Titicaca evaluando impacto ecológico y regeneración de biomasa. Establecer cadena de suministro local para procesamiento estandarizado de microfibras.
- Para sistemas híbridos implementar la proporción estándar 1.0%+1.0% maximizando resistencia a compresión. Para aplicaciones requiriendo máxima cohesión utilizar proporción 1.5%+1.5%. Para proyectos con restricciones presupuestarias aplicar proporción 0.5%+0.5%. Protocolo de mezclado: incorporar primero microfibras secas al suelo durante 15 minutos, después añadir goma Xanthan previamente disuelta en agua con humedad óptima entre 18.78-19.40%, mezclar 10 minutos adicionales. Compactar inmediatamente para optimizar formación de red híbrida fibra-biopolímero-matriz. Verificar parámetros múltiples: resistencia ≥ 1.75 kg/cm², esfuerzo de corte ≥ 0.88 kg/cm², cohesión ≥ 0.68 kg/cm², ángulo de fricción $\geq 10.24^\circ$. Implementar proyectos piloto de mediana escala antes de aplicación masiva. Monitorear desempeño durante primer año con inspecciones trimestrales. Desarrollar manuales técnicos para contratistas locales incluyendo procedimientos de mezclado, control de humedad y compactación. Capacitar personal en identificación visual de homogeneidad. Establecer especificaciones técnicas, métodos de ensayo estandarizados y criterios de aceptación para incorporación en normativas técnicas peruanas de estabilización de suelos.

7. Referencias Bibliográficas

- A.I., Oliveira, Júnior., J.F.T., Jucá., Janilson, Alves, Ferreira., L.C., Guilherme. (2019). *Geotechnical Behavior and Soil-Fiber Interaction of Clayey Soil Mixed with Randomly Dispersed Coconut Fibers*. doi: 10.28927/SR.422127
- Adel, K., Marat., S.B., Rakhmetulayeva. (2023). Analysis of video quality and its impact on face recognition for an online proctoring system. D. Serikbaev atyndaǵy shyǵys Qazaqstan tehnikalыq universitetinyn habarshysy, doi: 10.51885/1561-4212_2023_2_149
- Ala'a, F., Eftaiha., Musa, I., El-Barghouthi., Iyad, Rashid., Mayyas, Al-Remawi., Abdullah, I., Saleh., Adnan, A., Badwan. (2009). Compressibility and compactibility studies of chitosan, xanthan gum, and their mixtures. *Journal of Materials Science*, doi: 10.1007/S10853-008-3186-9
- Albaniza, Maria, da, Silva., Lêda, Christiane, de, Figueirêdo, Lopes, Lucena., Adriano, Elísio, de, Figueirêdo, Lopes, Lucena., José, Camapum, de, Carvalho., Paulo, Germano, Marinho. (2016). Estudo de parâmetros de compactação de solo para uso em pavimentos rodoviários. *Transportes*, doi: 10.14295/TRANSPORTES.V24I4.1098
- Alejandra, Constante., Selvum, Pillay., Haibin, Ning., Uday, K., Vaidya. (2015). Utilization of algae blooms as a source of natural fibers for biocomposite materials: Study of morphology and mechanical performance of *Lynghya* fibers. *Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts*, doi: 10.1016/J.ALGAL.2015.10.005
- Anderson, Gregory., Bailey, Wayne., Dolan, Colleen, M., Fajobi, Jide., Jensen, Darrick., Lancaster, Jr, Ronald, D., Maloney, Matthew., Michael, Nealis., Nordberg, Steven, C., Pascale, Peter., Andrew, Stockinger. (2019). Proctor test environment with user devices.
- Aparicio Ortubé, A.J., Camelo Espinosa, L.V., Henao Yepes, C.M., Londoño Luján, A.M., Salgado Correa, E.C., Sierra Hernández, M.C., Vanegas Chaverra, E.D., & Valencia González, Y. (2019). Metodología para la caracterización geotécnica de suelos tropicales derivados de rocas volcánicas. *INGE CUC*.
- Ashish, Pawar., Vaibhava, Singh. (2022). Geotechnical Site Characterization-A Review. *Journal of Geotechnical studies*, doi: 10.46610/jogs.2022.v07i02.001
- Assile, Abou, Diab., Shadi, Najjar., Salah, Sadek. (2018). Reliability-based design of spread footings on fibre-reinforced clay. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, doi: 10.1080/17499518.2017.1398332
- Cesar, Armando, Guillén, Guillén., Alberto, Muciño, Vélez., Luis, Fernando, Guerrero, Baca., Francisco, José, Cruz, Farrera. (2021). Optimización del proceso de elaboración de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) mediante el control granulométrico de las partículas del Suelo. *Nova Scientia*, doi: 10.21640/NS.V13I27.2891
- Chao, Zheng., Shuxiang, Song., Nan, Zhang., Kangwei, Xiong. (2024). Study on large scale direct shear test on soil-rock mixture with multiple grain grades in high fill slope engineering. doi: 10.62051/vf0cw887
- Chengjiang, Dai., Jin, Liu., Hong, Mei., Shefeng, Hao., Zezhuo, Song., Ying, Wang., Wen-yin, Che., Zhihao, Chen., Fanhua, Bu., Zi, Wang. (2023). Investigation into Xanthan Gum Biopolymer on Mitigating Cracking and Erosion Behavior of Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, doi: 10.1061/jmcee7.mteng-15975
- Chuan yi, Guo. (2022). Mechanical Performance of Compacted Earth Bricks (CEB) Incorporated by Raw and Treated Red Algae Fibers "Gelidium Sesquipedale". *Rilem bookseries*, doi: 10.1007/978-3-031-33465-8_41
- Daosheng, Ling., Tiantian, Hu., Jing, Wang., Xiukai, Wang., Changyu, Shi., Yao, Tang. (2024). Numerical study on the shear strength of granular materials under the low confining pressure. *Jiban Kōgakkai ronbun hōkokushū*, doi: 10.1016/j.sandf.2024.101447
- Ding, Zhaotang., Lu, Song., Wang, Hao., Du, Peng., Xu, Chuanjuan., Xu, Yajuan., Sun, Chengju., Wang, Wenqiang. (2017). Preparation process of compound xanthan gum additive.
- Ding, Zhaotang., Shi, Zengkun., Zhong, Liangjin., Nie, Jianwei., Wang, Wenqiang., Liang, Xiaojuan. (2016). Preparation method of compound mixing fertilizer containing xanthan gum fermentation waste.
- E., Huschek-Juhász., A., Nemeth., Mykola, Sysyn., G., Baranyai., J., Liu., Szabolcs, Fischer. (2024). Testing the fragmentation of railway ballast material by laboratory methods using Proctor compactor. *Naukovij visnik Nacional'noho girničogo universitetu*, doi: 10.33271/nvngu/2024-1/058
- Espinoza Cárdenas, M. (2022). Caracterización de las amplificaciones de onda del suelo blando en Cuenca.
- Fajar, Fikri, Amirullah., Hamdi, Hamdi., Letmi, Dwiridal., Harman, Amir., Syafriani., Ratnawulan, Ratnawulan. (2024). Compressive Strength Analysis of Mortar Made from Volcanic Sand in Nagari Aia Angek Based on Magnetic Mineral Content. *Pillar of Physics Education Jurnal Berkala Ilmiah Pendidikan Physics*, doi: 10.24036/15247171074
- Flores, E., Mendieta-Taboada, O., Ramírez, S., Reátegui, V., Rodríguez, W., Laínez, C., & Morales-Soriano, E. (2023). Efecto de dos métodos de carbonización artesanal en la elaboración de carbón vegetal a partir de semilla de aguaje (*Mauritia flexuosa*). En E. Flores,
- O. Mendieta-Taboada, S. Ramírez, V. Reátegui, W. Rodríguez, C. Laínez y E. Morales-Soriano, *Ciencia agroindustrial* (Vol. 13, Número 1, p. 33). Universidad Nacional de Trujillo. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2023.01.04>
- G., Bharathiraja., N., Karunakaran., V., Jayakumar., Saran, Ganesh. (2019). Investigation on fracture toughness of algae filler vinyl ester composite. *Materials Today: Proceedings*, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.01.162
- Guang, Liu., Ming, Cai., Huayan, Yao., Guan, Rong., Zhenghua, Zhang., Yanqiao, Wang. (2022). Strength estimation of granular rocks using a microstructure-based empirical model. *Engineering Failure Analysis*, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106761
- Guerini, Alexandre., Volpatti, Giovanni. (2019). Method for soil reinforcement using fine material and natural fibers.
- H., McCallion., D., M., Davies. (1955). Behaviour of Rubber in Compression under Dynamic Conditions. doi: 10.1243/PIME_PROC_1955_169_110_02
- He, Chaowen., Zhang, Le. (2019). Production process of algae active cell soil conditioner.
- Huabin, Wang., Xingfei, Zhou., Hongjie, An., Jielin, Sun., Yi, Zhang., Jun, Hu. (2008). Study of radial compression elasticity of single xanthan molecules by vibrating scanning polarization force microscopy. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, doi: 10.1166/JNN.2008.176
- Huifen, Liu., Peiyuan, Lin., Jianqiang, Wang. (2023). Machine learning approaches to estimation of the compressibility of soft soils. *Frontiers in Earth Science*, doi: 10.3389/feart.2023.1147825

- Husain, Abbas., Abdullah, Almajed., Tarek, H., Almusallam., Yousef, A., Al-Salloum. (2021). Fiber elements for soil stabilization.
- Jair, de, Jesús, Arrieta, Baldovino., Oriana, Palma, Calabokis., Manuel, Saba. (2024). From Bibliometric Analysis to Experimental Validation: Bibliometric and Literature Review of Four Cementing Agents in Soil Stabilization with Experimental Focus on Xanthan Gum. Sustainability, doi: 10.3390/su16135363
- Javier, Fernando, Camacho, Tauta., Oscar, Javier, Reyes, Ortiz., Dolly, Fernanda, Méndez, González. (2007). Ensayo de compactación giratoria en suelos como alternativa al ensayo de compactación proctor. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, doi: 10.18359/RCIN.1075
- Jing, Ni., Gang-Lai, Hao., Jia-Qi, Chen., Lei, Ma., Xueyu, Geng. (2021). The optimisation analysis of sand-clay mixtures stabilised with xanthan gum biopolymers. Sustainability, doi: 10.3390/SU13073732
- Joseph, Omeiza, Alao. (2024). Determination of the Geophysical Signature of Soft-clay and Hard Lateritic Soils and the Implications on Geotechnical Works Using Electrical Resistivity Imaging. doi: 10.1016/j.rines.2024.100025
- Junran, Zhang., Ming-xu, Jia., Tong, Jiang., Seishiro, Kato., Jingpei, Li., You, Gao., Zheng, Yang. (2024). Dynamic deformation characteristics and microscopic analysis of xanthan gum-treated silty soil during wetting process. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, doi: 10.1016/j.jrmge.2024.04.011
- Junran, Zhang., Zhihao, Meng., Tong, Jiang., Shao, Kai, Wang., Jindi, Zhao., Xinxin, Zhao. (2022). Experimental Study on the Shear Strength of Silt Treated by Xanthan Gum during the Wetting Process. Applied Sciences, doi: 10.3390/app12126053
- Leticia, Menezes, Santos, Sá., Erinaldo, Hilário, Cavalcante. (2022). Geotechnical characterization and georeferencing of some soft soil deposits of the metropolitan region of aracaju. Geociências, doi: 10.5016/geociencias.v41i02.16520
- Lin, Guo., Zhuo, Wang., Yilong, Sun., Xue, Dong. (2024). Experimental Investigation on the Compressive Behavior of Rubber–Sand Mixtures under Repeated Loading–Unloading. Journal of Materials in Civil Engineering, doi: 10.1061/jmcee7.mteng-17555
- Manuel, Gago-Guillán., Xurxo, García-Otero., S., Anguiano-Igea., Francisco, J., Otero-Espinar. (2023). Compression pressure-induced synergy in xanthan and locust bean gum hydrogels. Effect in drug delivery. Journal of Drug Delivery Science and Technology, doi: 10.1016/j.jddst.2023.105025
- Masaki, Kitazume., Kiyonobu, Kasama., Takao, Ueda. (2023). Direct shear characteristics of cement stabilized clay subjected to previous shear. E3S web of conferences, doi: 10.1051/e3sconf/202454411004
- Meng, Cui., Huihui, Xiong., Junjie, Zheng., Mingjuan, Cui., Suying, Lv., Hanjiang, Lai. (2024). Experimental Study on Multiscale Engineering Properties of EICP Combined with Xanthan Gum Solidified Sand. Journal of Materials in Civil Engineering, doi: 10.1061/jmcee7.mteng-17349
- Minhyeong, Lee., Dong-Yeop, Park., Yeong-Man, Kwon., Ilhan, Chang., Gye-Chun, Cho. (2023). Study on Crosslink-Induced Gelation of Xanthan Gum Biopolymer and Its Soil Strengthening Behavior as Sustainable Grout Material. doi: 10.1061/9780784484661.034
- Minhyeong, Lee., Ilhan, Chang., Gye-Chun, Cho. (2023). Advanced Biopolymer–Based Soil Strengthening Binder with Trivalent Chromium–Xanthan Gum Crosslinking for Wet Strength and Durability Enhancement. Journal of Materials in Civil Engineering, doi: 10.1061/jmcee7.mteng-16123
- Mohammed, Q., Waheed., Noor, M., Asmael. (2023). Using soft soil models in geotechnical engineering: a review paper. E3S web of conferences, doi: 10.1051/e3sconf/202453104018
- Mohit, K., Mistry., Tejaswani, Shukla., P., Venkateswalu., Shruti, Shukla., Chandresh, H., Solanki., Sanjay, Kumar, Shukla. (2018). A new mixing technique for randomly distributed fibre-reinforced expansive soil. doi: 10.1007/978-981-13-7010-6_15
- Nur, Addin, Fatkunada., Agata, Iwan, Candra., Dodi, Setiawan. (2024). Experimental Study of Soil Compaction with Proctor Standard Test Equipment. CIVED, doi: 10.24036/cived.v11i2.550
- Perilla, L.L., Pardo, S.A., & Jaimes, J.A. (2020). Caracterización geotécnica básica de un suelo arcilloso lacustre fisurado.
- Pouyan, Bagheri., Ivan, Gratchev., Maksym, Rybachuk. (2023). Effects of Xanthan Gum Biopolymer on Soil Mechanical Properties. Applied Sciences, doi: 10.3390/app13020887
- Poveda, G.M. (2023). Evaluación de la Estabilidad de Taludes Naturales en los Alveos, provincia de Coclé, Panamá. Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC.
- Pragya, Gupta., Ushendra, Kumar. (2024). Modifying Expansive Soil Characteristics with Xanthan Biopolymer Integration. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, doi: 10.22214/ijraset.2024.62193
- Qiang, Ma., Jiwei, Wu., Yu, Bai., Henglin, Xiao. (2023). Enhance the mechanical properties of the fiber-reinforced sandy soil using xanthan gum. doi: 10.21203/rs.3.rs-3155241/v1
- Rashid, Hajivand, Dastgerdi., Arif, Khan., Kamran, Kazemi., Michal, Kowalski., Agnieszka, Malinowska. (2024). Numerical investigation of box shape effects on soil direct shear test. Rakenteiden Mekaniikka, doi: 10.23998/rm.142264
- Scott, J., Wasman., Michael, McVay., Keith, Beriswill., David, Bloomquist., John, Shoucair., David, Horhota. (2013). Study of Laboratory Compaction System Variance Using an Automatic Proctor Calibration Device. Journal of Materials in Civil Engineering, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000599
- Seok, Hee, Hwang., Makara, Rith., Seong, Jae, Hong., Seung-Woo, Lee. (2015). Investigation on the Repeatability of Modified Proctor Test for Roller Compacted Concrete Pavement. doi: 10.12652/KSCE.2015.35.4.0931
- Sierra-Fernández, A., Gomez-Villalba, LS, Rabanal, ME, & González, RF (2017). Nuevos nanomateriales para aplicaciones en conservación y restauración de materiales pétreos: una revisión [Revisión de Nuevos nanomateriales para aplicaciones en conservación y restauración de materiales pétreos: una revisión]. Materiales de Construcción, 67(325), 107. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.07616>
- Sivakumar, Gowthaman., Kazunori, Nakashima., Satoru, Kawasaki. (2018). A State-of-the-Art Review on Soil Reinforcement Technology Using Natural Plant Fiber Materials: Past Findings, Present Trends and Future Directions. Materials, doi: 10.3390/MA11040553
- Soukayna, Talibi., Jonathan, Page., Chafika, Djelal., Latifa, Saâdi. (2024). Impact of treated red-algae fibers on physico-mechanical behavior of compressed earth bricks for construction. European Journal of Environmental and Civil Engineering, doi: 10.1080/19648189.2024.2329722
- Soukayna, Talibi., Jonathan, Page., Chafika, Djelal., Latifa, Saâdi. (2024). Impact of treated red-algae fibers on physico-mechanical

- behavior of compressed earth bricks for construction. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, doi: 10.1080/19648189.2024.2329722
- Sumit, Kumar., B., D., Yadav., Rohit, Raj. (2024).** A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil. *Deleted Journal*, doi: 10.1007/s42452-024-06087-7
- Suresh, Prasad, Singh., Ritesh, Das., Debatanu, Seth. (2020).** Plasticity and Strength Characteristics of Expansive Soil Treated with Xanthan Gum Biopolymer. doi: 10.1007/978-981-15-6237-2_54
- Syahputri, Sumanti., Hamdi, Hamdi., Akmam, Akmam., Harman, Amir., Syafriani., Ratnawulan, Ratnawulan. (2024).** Compressive Strength Analysis of Mortar Made from Volcanic Sand in Nagari Aia Angek Based on Magnetic Mineral Content. *Pillar of Physics Education: Jurnal Berkala Ilmiah Pendidikan Physics*, doi: 10.24036/15122171074
- Valeria, Cervantes, Luévano., Juana, María, Miranda, Vidales., Lilia, Narváez, Hernández. (2022).** Evaluation of *Pyropia Perforata* algae as consolidant in deteriorated linen fibers. *South Florida Journal of Development*, doi: 10.46932/sfjdv3n4-032
- Veasarach, Jonjaroen., Sarute, Ummartyotin., Supenya, Chittapun. (2020).** Algal cellulose as a reinforcement in rigid polyurethane foam. *Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts*, doi: 10.1016/J.ALGAL.2020.102057
- Viktor, Ramos., Claudio, Fernando, Mahler. (2023).** Comparison between DS, DSS and Triaxial Resistance Tests in Compacted Tropical Soils in the State of Rio de Janeiro, Brazil. *Asian Soil Research Journal*, doi: 10.9734/asrj/2023/v7i3130.
- Xutao, Zhang., Wenyue, Cao., Xiao, Zhang. (2024).** Experimental study on mechanical and hydraulic properties of xanthan gum improved low liquid limit silty soil. *Dental science reports*, doi: 10.1038/s41598-024-61875-w
- Yuting, Cheng., Bo, Wang., Weiqiao, Lv., Yuanliang, Zhong., Guohua, Li. (2023).** Effect of xanthan gum on physicochemical properties and 3D printability of emulsion-filled starch gels. *Food Hydrocolloids*, doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.109613
- Zakaria, Owusu-Yeboah., Mircea, Aniculăesi., Andreea, Vasilica, DASCALU., Iancu, Bogdan, TEODORU., Irina, Lungu. (2024).** Innovative experimental testing program of direct shear test in soil mechanics. *European Journal of Materials Science and Engineering*, doi: 10.36868/ejmse.2024.09.03.231
- Zambrano-Rendón, V.A., Ortiz-Hernández, E., & Alcívar-Moreira, W.S. (2021).** Caracterización geotécnica de los suelos de la ciudad de Calceta en la provincia de Manabí.

ANEXOS

ANEXO 1. EVIDENCIA DE SUMISIÓN DEL ARTICULO



yuly huachalla <yulyhuachalla13@gmail.com>

[ric] Reconocimiento de envío

1 mensaje

Omar Zegarra Marmanillo |Editor asistente <ric.ing@uc.cl>
A: yulissa Huachalla Pomari <yulyhuachalla13@gmail.com>

Jueves, 15 de enero de 2026 a las 16:46

yulissa Huachalla Pomari:

Gracias por enviar el manuscrito, "Efecto de la goma Xanthan y microfibras de Oedogonium en la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar la capacidad portante". a Revista Ingeniería de Construcción. Con el sistema de gestión de revistas en línea que estamos utilizando, podrá seguir su progreso a través del proceso editorial iniciando sesión en el sitio web de la revista:

URL de envío: [https:// revistaingenieriaconstruccion. uc.cl/index.php/ric/authorDashboard/submission/ 101234](https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/ric/authorDashboard/submission/101234) Nombre de usuario: yuly

Si tienes alguna pregunta, por favor contáctame. Gracias por considerar esta revista como un lugar para su trabajo.

Omar Zegarra Marmanillo |Editor asistente

Omar Zegarra Marmanillo

Editor asistente

{journalName} <http://ojs.uc.cl/index.php/ric>

Revista: Revista Ingeniería Construcción.

Fecha de sumisión: 15 de enero del 2026.

ANEXO 2. RESOLUCIÓN DE EXPEDITO



"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

RESOLUCIÓN N° 352-2026/UPeU-FIA-CF

Lima, Ñaña, 21 de abril de 2026

VISTO:

El expediente de los (las) bachilleres **Yulissa Huachalla Pomari** identificado(a) con código universitario N° 201520733 y **Isela Nelía Choque Peralta** identificado(a) con código universitario N° 201421324, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;

Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado "Efecto de la goma Xanthan y microfibras de Oedogonium en la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante", presentado por los (las) bachilleres **Yulissa Huachalla Pomari** y **Isela Nelía Choque Peralta** reuniendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 21 de abril de 2026, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Artículo 1. – DECLARAR EXPEDITO a los (las) bachilleres **Yulissa Huachalla Pomari** y **Isela Nelía Choque Peralta**, para que sustenten la tesis en formato artículo "Efecto de la goma Xanthan y microfibras de Oedogonium en la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante", conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Civil, el 19 de mayo, a las 14:00 horas, en la modalidad presencial, en el Auditorio Pedro Kalbermatter.

Artículo 2. – DESIGNAR EL JURADO DE SUSTENTACIÓN, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:

Presidente: Mg. Herson Duberly Pari Cusi
Secretario: Mtro. Leonel Chahuarés Paucar
Asesor: Mg. Gerardo William Pari Quispe
Vocal: MSc. Ecler Mamani Chambi

Artículo 3. – DISPONER que la presente Resolución sea registrada, comunicada a las instancias correspondientes y archivada conforme a ley.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA

Dr.
Ingeniero(a)
Licenciado(a)
Gobernadora General
Adjunta



Mg. Sc. Gina Marita Tito Tolentino
SECRETARIA ACADÉMICA

ANEXO 3. PANEL FOTOGRAFICO



FIGURA 1. Recolección de Oedogonium del Lago Titicaca de Puno



FIGURA 2. Ensayo de Limite Plastico



FIGURA 3. Ensayo de Limite Liquido



FIGURA 4. Ensayo de Compresión no Confinada



FIGURA 5. Ensayo de Compresión no Confinada

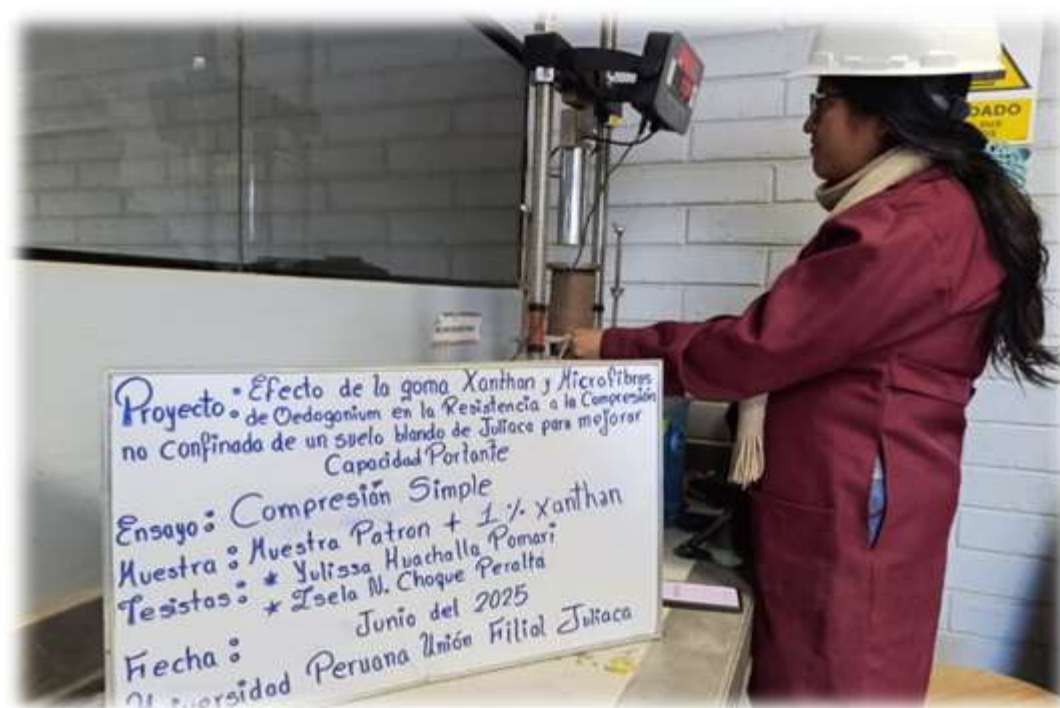


FIGURA 6. Ensayo de Compresión no Confinada

ANEXO 4. ENSAYOS DE LABORATORIO

 UNIVERSIDAD PERUNA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS	
TÍTULO DE TESIS	"Efecto de la goma xanthan y microfibras de dispozonum de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"
TESISTAS	Bach. Yulissa Hachalla Poma y bach. Isela Nelia Choque Paralta
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tariachi - Distrito de Juliaca
Descripción de muestra	Suelo natural
Fecha de ejec. de ensayo	28/05/2025
COMPRESIÓN NO CONFINADA ASTM D2166	
Estado de la muestra : Remoldeada	
N° de prueba: P-01	
Diámetro inferior (cm): 7.14 $\gamma_{d\ max}$ 1.80 gr/cm ³ Diámetro superior (cm): 7.15 γ_{humeda} 2.09 gr/cm ³ Diámetro medio (cm): 7.127 OCH 15.91% Diámetro promedio (cm): 7.14 Altura (cm): 14.09 Peso de la muestra (gr): 1174.00 Área (cm ²): 40.07 $\gamma_{humeda\ gr/cm^3}$ 2.08 Volumen (cm ³): 564.56	

Lectura (Dial (pulg))	Penetración (cm)	Deformación (cm)	Lectura de carga (kg)	Deformación unitaria	Factor de corrección	Área corregida (cm ²)	Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm ²)	Resistencia al corte o cohesión
0.000	0.00	14.09	0.00	0.0000	1.0000	40.07	0.0000	0.0000
0.010	0.025	14.06	12.50	0.0018	0.9982	40.14	0.3114	0.1557
0.020	0.051	14.04	15.50	0.0036	0.9964	40.22	0.3854	0.1927
0.030	0.076	14.01	18.50	0.0054	0.9945	40.29	0.4592	0.2296
0.040	0.102	13.99	20.50	0.0072	0.9928	40.36	0.5079	0.2540
0.050	0.127	13.95	21.00	0.0090	0.9910	40.43	0.5194	0.2597
0.075	0.191	13.90	24.50	0.0135	0.9865	40.62	0.6032	0.3016
0.100	0.254	13.84	29.00	0.0180	0.9820	40.81	0.7107	0.3553
0.125	0.318	13.77	33.50	0.0225	0.9775	40.99	0.8172	0.4086
0.150	0.381	13.71	36.50	0.0270	0.9730	41.18	0.8863	0.4431
0.200	0.508	13.58	41.50	0.0361	0.9639	41.57	0.9963	0.4992
0.250	0.635	13.45	45.50	0.0451	0.9549	41.96	1.0843	0.5422



Esfuerzo de corte (c)	0.54 kg/cm ²
Resistencia a la compresión máxima (qu)	1.08 kg/cm ²

Los ensayos fueron realizados por los leistas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

 UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS	
TÍTULO DE TESIS	"Efecto de la goma xantán y microfibras de depogonum de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"
TESISTAS	Bach. Yulissa Hachalla Pomari y bach. Isela Nelia Choque Peralla
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tanachi - Distrito de Juliaca
Descripción de muestra	Suelo Natural + 1% goma xantán
Fecha de ejec. de ensayo	28/05/2025
Estado de la muestra :	
N° de prueba: P-01	
Remoldeado	
ENSAYO: COMPRESIÓN NO CONFINADA ASTM D2166	
Diámetro inferior (cm): 7.134 γ_d max: 1.74 Diámetro superior (cm): 7.197 γ húmeda max: 2.03 Diámetro medio (cm): 7.135 OCH: 16.40% Diámetro promedio (cm): 7.17 Altura (cm): 14.04 Peso de la muestra (gr): 1157.00 Área (cm ²): 40.33 γ húmeda muestra gr/cm ³ : 2.04 Volumen (cm ³): 566.03	

Lectura Dial (milg)	Penetración (cm)	Deformación (cm)	Lectura de carga (kg)	Deformación unitaria	Factor de corrección	Área corregida (cm ²)	Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm ²)	Resistencia al corte o cohesión
0.000	0.00	14.04	0.00	0.0000	1.0000	40.33	0.0000	0.0000
0.010	0.025	14.01	14.50	0.0018	0.9982	40.40	0.3589	0.1794
0.020	0.051	13.98	20.50	0.0036	0.9964	40.48	0.5065	0.2532
0.030	0.076	13.96	24.50	0.0054	0.9946	40.55	0.6042	0.3021
0.040	0.102	13.93	26.50	0.0072	0.9928	40.62	0.6523	0.3252
0.050	0.127	13.91	32.50	0.0090	0.9910	40.70	0.7986	0.3993
0.075	0.191	13.84	38.50	0.0136	0.9864	40.88	0.9417	0.4708
0.100	0.254	13.78	43.00	0.0181	0.9819	41.07	1.0469	0.5235
0.125	0.318	13.72	48.50	0.0226	0.9774	41.26	1.1754	0.5877
0.150	0.381	13.65	52.50	0.0271	0.9729	41.45	1.2665	0.6332
0.200	0.508	13.53	61.00	0.0362	0.9638	41.84	1.4578	0.7289
0.250	0.635	13.40	67.50	0.0452	0.9548	42.24	1.5890	0.7990
0.300	0.762	13.27	71.50	0.0543	0.9457	42.64	1.6767	0.8383
0.350								
0.400								



Esfuerzo de corte (c)	0.84 kg/cm ²
Resistencia a la compresión máxima (qu)	1.68 kg/cm ²



**Los ensayos fueron realizados por los tesisas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación

		UNIVERSIDAD PERUNA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS						
TÍTULO DE TESIS		"Efecto de la goma xantán y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Julaca para mejorar capacidad portante"						
TESISTAS		Bach. Yulissa Hachalla Pomari y bach. Isela Nela Choque Pomilla						
Procedencia de muestra		Comunidad de Esquin Tariachi - Distrito de Julaca						
Descripción de muestra		Suelo Natural + 2% goma xantán						
Fecha de ejec. de ensayo		30/05/2025						
		Estado de la muestra :	N° de prueba: P-01 Remoldeado					
COMPRESIÓN NO CONFINADA ASTM D2166		Diámetro inferior (cm):	7.11	$\gamma_{d\ max}$	1.83			
		Diámetro superior (cm):	7.16	$\gamma_{h\ meda}$	2.18			
		Diámetro medio (cm):	7.18	OCH	19.24%			
		Diámetro promedio (cm):	7.16	Altura (cm):	14.08			
		Peso de la muestra (gr):	1225.00	Área (cm²):	40.21			
		$\gamma_{h\ meda}$ muestra gr/cm³	2.16	Volumen (cm³)	566.34			
Lectura Dial (mil)	Penetración (cm)	Deformación (cm)	Lectura de carga (kg)	Deformación unitaria	Factor de corrección	Área corregida (cm²)	Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm²)	Resistencia al corte o cohesión
0.000	0.00	14.08	0.00	0.0000	1.0000	40.21	0.0000	0.0000
0.010	0.025	14.06	15.00	0.0018	0.9982	40.29	0.3723	0.1862
0.020	0.051	14.03	17.50	0.0036	0.9964	40.36	0.4336	0.2168
0.030	0.076	14.01	23.50	0.0054	0.9946	40.43	0.5812	0.2906
0.040	0.102	13.98	28.00	0.0072	0.9928	40.51	0.6913	0.3456
0.050	0.127	13.96	32.50	0.0090	0.9910	40.58	0.8009	0.4005
0.075	0.191	13.89	36.50	0.0135	0.9865	40.76	0.8954	0.4477
0.100	0.254	13.83	43.00	0.0180	0.9820	40.96	1.0500	0.5250
0.125	0.318	13.77	49.00	0.0225	0.9775	41.14	1.1910	0.5965
0.150	0.381	13.70	55.50	0.0271	0.9729	41.33	1.3428	0.6714
0.200	0.508	13.58	62.00	0.0361	0.9639	41.72	1.4882	0.7431
0.250	0.635	13.45	68.50	0.0451	0.9549	42.11	1.6286	0.8133
0.300	0.762	13.32	77.00	0.0541	0.9459	42.51	1.8112	0.9056
0.350								
0.400								



Esfuerzo de corte (c)	0.91 kg/cm²
Resistencia a la compresión máxima (qu)	1.81 kg/cm²

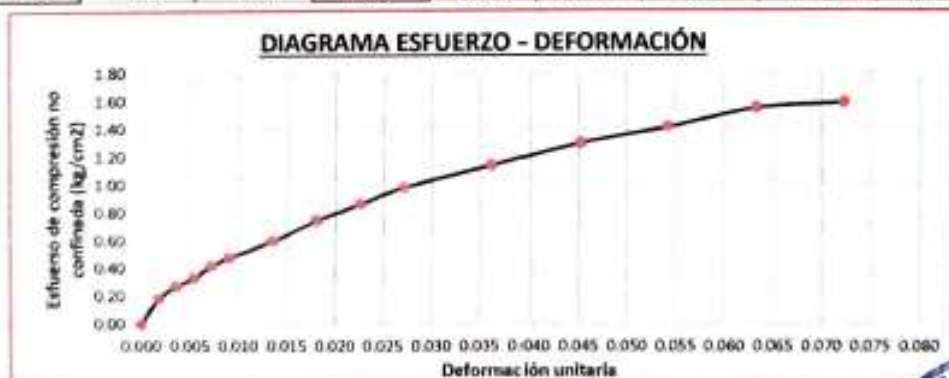
*Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos por la normativa. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

**Se deja constancia que el control de densidades fue efectuado por los testistas.



 UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS			
TÍTULO DE TESIS		"Efecto de la goma xantán y microfibras de depogonum de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"	
TESISTAS		Bach. Yuliana Hachalia Pomari y bach. Isella Nelia Choque Parafía	
Procedencia de muestra		Comunidad de Esquesen Janachi - Distrito de Juliaca	
Descripción de muestra		Suelo Natural + 3% goma xantán	
Fecha de ejecución de ensayo		30/05/2025	
		Estado de la muestra :	Nº de pruebas: P-01
			Remoldeado
COMPRESIÓN NO CONFINADA ASTM D2166		Diámetro inferior (cm)	7.06
		Diámetro superior (cm)	7.21
		Diámetro medio (cm)	7.22
		Diámetro promedio (cm)	7.17
		Peso de la muestra (gr)	1218.00
		Y húmeda muestra gr/cm3	2.15
	Y_d max	1.73	
	Y_{húmeda} max	2.07	
	OCH	19.83%	
	Altura (cm)	14.05	
	Area (cm2)	40.41	
	Volumen (cm3)	567.65	

Lectura Dial (milg)	Penetración (cm)	Deformación (cm)	Lectura de carga (kg)	Deformación unitaria	Factor de corrección	Area corregida (cm2)	Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm2)	Resistencia al corte o cohesión
0.000	0.00	14.05	0.00	0.0000	1.0000	40.41	0.0000	0.0000
0.010	0.025	14.02	7.50	0.0018	0.9982	40.48	0.1853	0.0926
0.020	0.051	14.00	11.00	0.0036	0.9964	40.55	0.2712	0.1356
0.030	0.076	13.97	13.50	0.0054	0.9946	40.63	0.3323	0.1661
0.040	0.102	13.95	17.00	0.0072	0.9928	40.70	0.4177	0.2088
0.050	0.127	13.92	19.50	0.0090	0.9910	40.78	0.4782	0.2391
0.075	0.191	13.86	24.50	0.0136	0.9864	40.96	0.5981	0.2991
0.100	0.254	13.79	30.50	0.0181	0.9819	41.15	0.7412	0.3706
0.125	0.318	13.73	35.50	0.0226	0.9774	41.34	0.8587	0.4293
0.150	0.381	13.67	40.50	0.0271	0.9729	41.53	0.9751	0.4876
0.200	0.508	13.54	47.50	0.0362	0.9638	41.92	1.1330	0.5665
0.250	0.635	13.41	54.50	0.0452	0.9548	42.32	1.2878	0.6439
0.300	0.762	13.29	60.00	0.0542	0.9458	42.72	1.4043	0.7022
0.350	0.889	13.16	66.50	0.0633	0.9367	43.14	1.5416	0.7708
0.400	1.016	13.03	69.00	0.0723	0.9277	43.56	1.5841	0.7921



Esfuerzo de corte (c)	0.79 kg/cm2
Resistencia a la compresión máxima (qu)	1.40 kg/cm2



*Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos por la normativa. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

**Se deja constancia que el control de densidades fue efectuado por los testistas.

 UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS								
TÍTULO DE TESIS		"Efecto de la goma xantán y microfibras de depogomum de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Jilisco para mejorar capacidad portante"						
TESISTAS		Bach. Yulisa Hachulla Pumari y Bach. Isela Nika Choque Paralta						
Procedencia de muestra		Comunidad de Engen. Tantiachi - Distrito de Jilisco						
Descripción de muestra		Suelo Natural + 1% microfibras de depogomum					N° de prueba P-02	
Fecha de ejec. de ensayo		24/06/2025		Estado de la muestra :			Remoldeado	
COMPRESIÓN NO CONFINADA ASTM D2166				Diámetro inferior (cm)		7.110	<i>Y_{l max}</i>	1.92
				Diámetro superior (cm)		7.12	<i>Y_{hmeda max}</i>	2.16
				Diámetro medio (cm)		7.123	OCH	12.35%
				Diámetro promedio (cm)		7.12	Altura (cm)	14.06
				Peso de la muestra (gr)		1208.00	Área (cm ²)	39.82
				<i>Y_{hmeda muestra}</i> gr/cm ³		2.16	Volumen (cm ³)	559.66
Lectura Dial (milg)	Penetración (cm)	Deformación (cm)	Lectura de carga (kg)	Deformación unitaria	Factor de corrección	Área corregida (cm ²)	Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm ²)	Resistente al corte o cohesión
0.000	0.00	14.06	0.00	0.0000	1.0000	39.82	0.0000	0.0000
0.010	0.025	14.03	9.00	0.0018	0.9982	39.89	0.2256	0.1128
0.020	0.051	14.00	13.00	0.0036	0.9964	39.96	0.3253	0.1627
0.030	0.076	13.98	16.50	0.0054	0.9946	40.04	0.4121	0.2061
0.040	0.102	13.95	19.00	0.0072	0.9928	40.11	0.4737	0.2369
0.050	0.127	13.93	21.50	0.0090	0.9910	40.18	0.5351	0.2675
0.075	0.191	13.86	26.00	0.0136	0.9864	40.37	0.6441	0.3221
0.100	0.254	13.80	30.00	0.0181	0.9818	40.55	0.7398	0.3699
0.125	0.318	13.74	35.50	0.0226	0.9774	40.74	0.8714	0.4357
0.150	0.381	13.67	42.00	0.0271	0.9729	40.93	1.0262	0.5131
0.200	0.508	13.55	52.50	0.0361	0.9638	41.31	1.2708	0.6354
0.250	0.635	13.42	63.00	0.0452	0.9548	41.70	1.5107	0.7554
0.300	0.762	13.29	70.50	0.0542	0.9458	42.10	1.6746	0.8373
0.350	0.889	13.17	76.50	0.0633	0.9367	42.51	1.7997	0.8999
0.400	1.016	13.04	78.00	0.0723	0.9277	42.92	1.8173	0.9087



Esfuerzo de corte (c)	0.84 kg/cm²
Resistencia a la compresión máxima (qu)	1.67 kg/cm²

*Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos por la normativa. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

**Se deja constancia que el control de densidades fue efectuado por los testistas.



 UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS			
TÍTULO DE TESIS	"Efecto de la goma xanthan y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"		
TESTISTAS	Bach. Yulissa Hachalla Pomari y bach. Isela Nelia Choque Peralta		
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tanachi - Distrito de Juliaca		
Descripción de muestra	Suelo Natural + 0.5% goma xanthan + 0.5% microfibras de depogonium		
Fecha de ejec. de ensayo	25/06/2025		
Estado de la muestra :	N° de prueba: P-01		
Remoldeado			
ENSAYO: COMPRESIÓN NO CONFINADA ASTM D2166			
Dámetro inferior (cm)	7.26	$\gamma_{d\ max}$	1.81
Dámetro superior (cm)	7.21	$\gamma_{humeda\ max}$	2.16
Dámetro medio (cm)	7.22	OCH	19.40%
Dámetro promedio (cm)	7.22	Altura (cm)	14.03
Peso de la muestra (gr)	1241.00	Area (cm²)	40.97
$\gamma_{humeda\ muestra\ gr/cm^3}$	2.16	Volumen (cm³)	574.72

Lectura Dial (pulg)	Penetración (cm)	Deformación (cm)	Lectura de carga (kg)	Deformación unitaria	Factor de corrección	Area corregida (cm ²)	Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm ²)	Resistencia al corte o cohesión
0.000	0.00	14.03	0.00	0.0000	1.0000	40.97	0.0000	0.0000
0.010	0.025	14.00	5.50	0.0018	0.9982	41.05	0.1340	0.0670
0.020	0.051	13.96	7.00	0.0036	0.9964	41.12	0.1702	0.0851
0.030	0.076	13.95	10.50	0.0054	0.9946	41.20	0.2549	0.1274
0.040	0.102	13.93	15.00	0.0072	0.9928	41.27	0.3634	0.1817
0.050	0.127	13.90	19.50	0.0091	0.9909	41.35	0.4716	0.2358
0.075	0.191	13.84	28.00	0.0136	0.9864	41.54	0.6741	0.3371
0.100	0.254	13.77	36.50	0.0181	0.9819	41.73	0.8747	0.4374
0.125	0.318	13.71	45.50	0.0226	0.9774	41.92	1.0854	0.5427
0.150	0.381	13.65	56.00	0.0272	0.9728	42.12	1.3296	0.6648
0.200	0.508	13.52	89.00	0.0362	0.9638	42.51	1.6231	0.8115
0.250	0.635	13.39	74.00	0.0453	0.9547	42.92	1.7243	0.8622
0.300	0.762	13.27	76.50	0.0543	0.9457	43.33	1.7657	0.8828
0.350	0.889	13.14	76.50	0.0634	0.9366	43.75	1.7488	0.8744
0.400								



Esfuerzo de corte (c)	0.88 kg/cm ²
Resistencia a la compresión máxima (qu)	1.77 kg/cm ²

*Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos por la normativa. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

**Se deja constancia que el control de densidades fue efectuado por los testistas.



UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

TÍTULO DE TESIS	"Efecto de la goma xantán y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"		
TESISTAS	Bach. Yulissa Hachalla Pomari y bach. Isela Nelia Choque Peralta.		
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tariachi - Distrito de Juliaca		
Descripción de muestra	Suelo Natural + 1.0% goma xantán + 1.0% microfibras de depogonium	N° de prueba: P-01	
Fecha de ejec. de ensayo	25/06/2025	Estado de la muestra :	Remoldeado
ENSAYO:			
COMPRESIÓN NO CONFINADA ASTM D2166	Diámetro inferior (cm):	7.21	$\gamma_d \text{ max}$ 1.81
	Diámetro superior (cm):	7.20	$\gamma_{\text{húmeda max}}$ 2.15
	Diámetro medio (cm):	7.21	OCH 18.78%
	Diámetro promedio (cm):	7.21	Altura (cm): 14.05
	Peso de la muestra (gr):	1230.00	Área (cm ²): 40.79
	$\gamma_{\text{húmeda muestra}}$ gr/cm ³	2.15	Volumen (cm ³): 573.01

Lectura Dial (milg)	Penetración (cm)	Deformación (cm)	Lectura de carga (kg)	Deformación unitaria	Factor de corrección	Área corregida (cm ²)	Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm ²)	Resistencia al corte o cohesión
0.000	0.00	14.05	0.00	0.0000	1.0000	40.79	0.0000	0.0000
0.010	0.025	14.02	8.50	0.0018	0.9982	40.88	0.2080	0.1040
0.020	0.051	14.00	10.50	0.0036	0.9964	40.94	0.2565	0.1282
0.030	0.076	13.97	13.00	0.0054	0.9946	41.01	0.3170	0.1585
0.040	0.102	13.95	16.00	0.0072	0.9928	41.09	0.3894	0.1947
0.050	0.127	13.92	18.00	0.0090	0.9910	41.16	0.4373	0.2187
0.075	0.191	13.86	26.50	0.0136	0.9864	41.35	0.6409	0.3204
0.100	0.254	13.79	35.00	0.0181	0.9819	41.54	0.8426	0.4213
0.125	0.318	13.73	45.00	0.0226	0.9774	41.73	1.0783	0.5392
0.150	0.381	13.67	57.00	0.0271	0.9729	41.93	1.3585	0.6798
0.200	0.508	13.54	68.50	0.0362	0.9638	42.32	1.6187	0.8093
0.250	0.635	13.41	74.00	0.0452	0.9548	42.72	1.7322	0.8661
0.300	0.762	13.29	78.00	0.0542	0.9458	43.13	1.8085	0.9043
0.350								
0.400								



Esfuerzo de corte (c)	0.90 kg/cm ²
Resistencia a la compresión máxima (qu)	1.81 kg/cm ²

*Los ensayos fueron realizados por los tesisas, siguiendo los procedimientos establecidos por la normativa. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

**Se dejó constancia que el control de densidades fue efectuado por los tesisas.

 UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS																																																																																																																																																
TÍTULO DE TESIS	"Efecto de la goma xanthan y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"																																																																																																																																															
TESISTAS	Bach. Yulissa Hochalla Pomari y bach. Isela Nelia Choque Paralta																																																																																																																																															
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tariachi - Distrito de Juliaca																																																																																																																																															
Descripción de muestra	Suelo Natural + 1.5% goma xanthan + 1.5% microfibras de depogonium																																																																																																																																															
Fecha de ejec. de ensayo	25/06/2025																																																																																																																																															
Estado de la muestra :																																																																																																																																																
Remoldeado																																																																																																																																																
ENSAYO: COMPRESIÓN NO CONFINADA ASTM D2166																																																																																																																																																
<table border="1"> <tr> <td>Dímetro inferior (cm):</td> <td>7.16</td> <td>$Y_{d\ max}$</td> <td>1.82</td> </tr> <tr> <td>Dímetro superior (cm):</td> <td>7.19</td> <td>$Y_{h\meda\ max}$</td> <td>2.17</td> </tr> <tr> <td>Dímetro medio (cm):</td> <td>7.21</td> <td>OCH</td> <td>19.25%</td> </tr> <tr> <td>Dímetro promedio (cm):</td> <td>7.19</td> <td>Altura (cm):</td> <td>14.04</td> </tr> <tr> <td>Peso de la muestra (gr):</td> <td>1235.00</td> <td>Area (cm²):</td> <td>40.55</td> </tr> <tr> <td>$Y_{h\meda\ muestra\ gr/cm^3}$</td> <td>2.17</td> <td>Volumen (cm³):</td> <td>569.37</td> </tr> </table>		Dímetro inferior (cm):	7.16	$Y_{d\ max}$	1.82	Dímetro superior (cm):	7.19	$Y_{h\meda\ max}$	2.17	Dímetro medio (cm):	7.21	OCH	19.25%	Dímetro promedio (cm):	7.19	Altura (cm):	14.04	Peso de la muestra (gr):	1235.00	Area (cm ²):	40.55	$Y_{h\meda\ muestra\ gr/cm^3}$	2.17	Volumen (cm ³):	569.37																																																																																																																							
Dímetro inferior (cm):	7.16	$Y_{d\ max}$	1.82																																																																																																																																													
Dímetro superior (cm):	7.19	$Y_{h\meda\ max}$	2.17																																																																																																																																													
Dímetro medio (cm):	7.21	OCH	19.25%																																																																																																																																													
Dímetro promedio (cm):	7.19	Altura (cm):	14.04																																																																																																																																													
Peso de la muestra (gr):	1235.00	Area (cm ²):	40.55																																																																																																																																													
$Y_{h\meda\ muestra\ gr/cm^3}$	2.17	Volumen (cm ³):	569.37																																																																																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Lectura Dial (milg)</th> <th>Penetración (cm)</th> <th>Deformación (cm)</th> <th>Lectura de carga (kg)</th> <th>Deformación unitaria</th> <th>Factor de corrección</th> <th>Area corregida (cm²)</th> <th>Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm²)</th> <th>Resistencia al corte o cohesión</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.000</td><td>0.00</td><td>14.04</td><td>0.00</td><td>0.0000</td><td>1.0000</td><td>40.55</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr> <tr><td>0.010</td><td>0.025</td><td>14.02</td><td>7.50</td><td>0.0018</td><td>0.9982</td><td>40.62</td><td>0.1846</td><td>0.0923</td></tr> <tr><td>0.020</td><td>0.051</td><td>13.99</td><td>11.00</td><td>0.0036</td><td>0.9964</td><td>40.70</td><td>0.2703</td><td>0.1351</td></tr> <tr><td>0.030</td><td>0.076</td><td>13.96</td><td>13.50</td><td>0.0054</td><td>0.9946</td><td>40.77</td><td>0.3311</td><td>0.1656</td></tr> <tr><td>0.040</td><td>0.102</td><td>13.94</td><td>17.00</td><td>0.0072</td><td>0.9928</td><td>40.85</td><td>0.4162</td><td>0.2081</td></tr> <tr><td>0.050</td><td>0.127</td><td>13.91</td><td>19.50</td><td>0.0090</td><td>0.9910</td><td>40.92</td><td>0.4765</td><td>0.2383</td></tr> <tr><td>0.075</td><td>0.191</td><td>13.85</td><td>24.50</td><td>0.0136</td><td>0.9864</td><td>41.11</td><td>0.5960</td><td>0.2980</td></tr> <tr><td>0.100</td><td>0.254</td><td>13.79</td><td>31.50</td><td>0.0181</td><td>0.9819</td><td>41.30</td><td>0.7627</td><td>0.3814</td></tr> <tr><td>0.125</td><td>0.318</td><td>13.72</td><td>37.00</td><td>0.0226</td><td>0.9774</td><td>41.49</td><td>0.8918</td><td>0.4459</td></tr> <tr><td>0.150</td><td>0.381</td><td>13.66</td><td>45.00</td><td>0.0271</td><td>0.9729</td><td>41.68</td><td>1.0796</td><td>0.5398</td></tr> <tr><td>0.200</td><td>0.508</td><td>13.53</td><td>62.50</td><td>0.0362</td><td>0.9638</td><td>42.07</td><td>1.4855</td><td>0.7427</td></tr> <tr><td>0.250</td><td>0.635</td><td>13.41</td><td>73.50</td><td>0.0452</td><td>0.9548</td><td>42.47</td><td>1.7306</td><td>0.8653</td></tr> <tr><td>0.300</td><td>0.762</td><td>13.28</td><td>77.50</td><td>0.0543</td><td>0.9457</td><td>42.88</td><td>1.8074</td><td>0.9037</td></tr> <tr><td>0.350</td><td>0.889</td><td>13.15</td><td>79.00</td><td>0.0633</td><td>0.9367</td><td>43.29</td><td>1.8248</td><td>0.9124</td></tr> <tr><td>0.400</td><td>1.016</td><td>13.02</td><td>79.00</td><td>0.0724</td><td>0.9276</td><td>43.71</td><td>1.8072</td><td>0.9036</td></tr> </tbody> </table>	Lectura Dial (milg)	Penetración (cm)	Deformación (cm)	Lectura de carga (kg)	Deformación unitaria	Factor de corrección	Area corregida (cm ²)	Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm ²)	Resistencia al corte o cohesión	0.000	0.00	14.04	0.00	0.0000	1.0000	40.55	0.0000	0.0000	0.010	0.025	14.02	7.50	0.0018	0.9982	40.62	0.1846	0.0923	0.020	0.051	13.99	11.00	0.0036	0.9964	40.70	0.2703	0.1351	0.030	0.076	13.96	13.50	0.0054	0.9946	40.77	0.3311	0.1656	0.040	0.102	13.94	17.00	0.0072	0.9928	40.85	0.4162	0.2081	0.050	0.127	13.91	19.50	0.0090	0.9910	40.92	0.4765	0.2383	0.075	0.191	13.85	24.50	0.0136	0.9864	41.11	0.5960	0.2980	0.100	0.254	13.79	31.50	0.0181	0.9819	41.30	0.7627	0.3814	0.125	0.318	13.72	37.00	0.0226	0.9774	41.49	0.8918	0.4459	0.150	0.381	13.66	45.00	0.0271	0.9729	41.68	1.0796	0.5398	0.200	0.508	13.53	62.50	0.0362	0.9638	42.07	1.4855	0.7427	0.250	0.635	13.41	73.50	0.0452	0.9548	42.47	1.7306	0.8653	0.300	0.762	13.28	77.50	0.0543	0.9457	42.88	1.8074	0.9037	0.350	0.889	13.15	79.00	0.0633	0.9367	43.29	1.8248	0.9124	0.400	1.016	13.02	79.00	0.0724	0.9276	43.71	1.8072	0.9036
Lectura Dial (milg)	Penetración (cm)	Deformación (cm)	Lectura de carga (kg)	Deformación unitaria	Factor de corrección	Area corregida (cm ²)	Esfuerzo de compresión confinada (kg/cm ²)	Resistencia al corte o cohesión																																																																																																																																								
0.000	0.00	14.04	0.00	0.0000	1.0000	40.55	0.0000	0.0000																																																																																																																																								
0.010	0.025	14.02	7.50	0.0018	0.9982	40.62	0.1846	0.0923																																																																																																																																								
0.020	0.051	13.99	11.00	0.0036	0.9964	40.70	0.2703	0.1351																																																																																																																																								
0.030	0.076	13.96	13.50	0.0054	0.9946	40.77	0.3311	0.1656																																																																																																																																								
0.040	0.102	13.94	17.00	0.0072	0.9928	40.85	0.4162	0.2081																																																																																																																																								
0.050	0.127	13.91	19.50	0.0090	0.9910	40.92	0.4765	0.2383																																																																																																																																								
0.075	0.191	13.85	24.50	0.0136	0.9864	41.11	0.5960	0.2980																																																																																																																																								
0.100	0.254	13.79	31.50	0.0181	0.9819	41.30	0.7627	0.3814																																																																																																																																								
0.125	0.318	13.72	37.00	0.0226	0.9774	41.49	0.8918	0.4459																																																																																																																																								
0.150	0.381	13.66	45.00	0.0271	0.9729	41.68	1.0796	0.5398																																																																																																																																								
0.200	0.508	13.53	62.50	0.0362	0.9638	42.07	1.4855	0.7427																																																																																																																																								
0.250	0.635	13.41	73.50	0.0452	0.9548	42.47	1.7306	0.8653																																																																																																																																								
0.300	0.762	13.28	77.50	0.0543	0.9457	42.88	1.8074	0.9037																																																																																																																																								
0.350	0.889	13.15	79.00	0.0633	0.9367	43.29	1.8248	0.9124																																																																																																																																								
0.400	1.016	13.02	79.00	0.0724	0.9276	43.71	1.8072	0.9036																																																																																																																																								




Esfuerzo de corte (c)	0.90 kg/cm ²
Resistencia a la compresión máxima (qu)	1.81 kg/cm ²

*Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos por la normativa. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

**Se deja constancia que el control de densidades fue efectuado por los testistas.



UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

PROYECTO DE TESIS	"Efecto de la goma xantana y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"
TESISTAS	Bach. Yulissa Machalla Pomari y bach. Isela Nela Choque Peralta
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tariachi - Distrito de Juliaca
Descripción de muestra	Suelo natural
Fecha de ejec. de ensayo	27/03/2025

ENLAYO:	Nro de Muestra	M-01
COMPACTACIÓN DE SUELOS	Descripción de muestra	Alterada
	Método de Compactación	Método "A"
	Nro de capas	03 capas
	Material utilizado	Pasante el tamiz N°4*
NTP 339.142, MTC E 115		Proctor Modificado

DESCRIPCIÓN	CONTROL DE DENSIDAD			
Volumen del Molde	cm ³	911.24	911.24	911.24
Peso del Molde	gr	4373.00	4373.00	4373.00
Peso Suelo Humedo + Molde	gr	6118.00	6259.00	6270.00
Peso del Suelo Humedo	gr	1745.00	1886.00	1897.00
Densidad del Suelo Humedo	gr/cm ³	1.91	2.07	2.08
				1.97

DESCRIPCIÓN		CONTROL DE HUMEDAD							
Capsula No	No	B-02	T-110	T-111	T-348	T-210	T-347	T-271	B-01
Suelo Humedo + Capsula	gr	68.34	75.07	70.59	54.68	51.33	45.61	49.61	59.18
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr	63.01	69.02	64.22	49.29	44.97	40.31	43.85	52.99
Peso del Agua	gr	5.33	6.05	6.37	5.39	6.36	5.50	5.76	6.19
Peso de la Capsula	gr	21.78	21.94	22.18	13.96	8.47	8.44	13.72	21.12
Peso del Suelo Seco	gr	41.23	47.08	42.04	35.33	36.50	31.87	30.13	31.87
% de Humedad	%	12.93%	12.85%	15.15%	15.26%	17.42%	17.26%	19.12%	19.42%
Promedio de Humedad	%	12.89%		15.20%		17.34%		19.27%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cm3	1.696		1.797		1.774		1.649	



*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por las tesis, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones

**Los ensayos fueron realizados por las tesis, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación





UNIVERSIDAD PERUNA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

PROYECTO DE TESIS	"Efecto de la goma xanthan y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"
TESISTAS	Bach. Yulissa Hachalla Pomari y bach. Isela Nella Choque Peralta
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tarlachi - Distrito de Juliaca
Descripción de muestra	Suelo natural + 1% goma xanthan
Fecha de ejec. de ensayo	03/04/2025

COMPACTACIÓN DE SUELOS NTP 339.142, MTC E 118	Nro de Muestra	M-01
	Descripción de muestra	Alterada
	Método de Compactación	Método "A"
	Nro de capas	03 capas
	Material utilizado	Pasante el tamiz N°4*
		Proctor Modificado

DESCRIPCIÓN	CONTROL DE DENSIDAD			
Volumen del Molde	cm ³	947.90	947.90	947.90
Peso del Molde	gr	4373.00	4373.00	4373.00
Peso Suelo Humedo + Molde	gr	6156.00	6257.00	6298.00
Peso del Suelo Humedo	gr	1783.00	1884.00	1925.00
Densidad del Suelo Humedo	gr/cm ³	1.88	1.99	2.03

DESCRIPCIÓN		CONTROL DE HUMEDAD							
Capsula No	No	T-005	T-006	T-028	T-02	T-348	T-258	T-008	T-009
Suelo Humedo + Capsula	gr	60.54	59.22	74.24	58.52	57.53	63.61	50.58	54.85
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr	55.48	54.21	67.13	52.98	51.14	56.22	45.02	48.58
Peso del Agua	gr	5.06	5.01	7.11	5.54	6.39	7.39	5.56	6.27
Peso de la Capsula	gr	16.73	15.91	20.18	16.19	13.89	13.14	16.01	16.33
Peso del Suelo Seco	gr	38.75	38.30	46.95	36.79	37.25	43.08	29.01	32.25
% de Humedad	%	13.06%	13.08%	15.14%	15.06%	17.15%	17.15%	19.17%	19.44%
Promedio de Humedad	%	13.07%		15.10%		17.15%		19.30%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cm3	1.664		1.727		1.733		1.677	



MAXIMA DENSIDAD SECA	1.74 gr/cm ³
ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	16.40%

*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por las tesis, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones

**Los ensayos fueron realizados por las tesis, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.





UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

PROYECTO DE TESIS	"Efecto de la goma xanthan y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"
TESISTAS	Bach. Yulissa Hachalla Pomari y bach. Isela Nella Choques Peralta
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tariachi - Distrito de Juliaca
Descripción de muestra	Suelo natural + 1% goma xanthan
Fecha de ejec. de ensayo	18/03/2025

ENSAYO: COMPACTACIÓN DE SUELOS NTP 339.142.MTC E 116	Nro de Muestra	M-01
	Descripción de muestra	Alterada
	Método de Compactación	Método "A"
	Nro de capas	03 capas
	Material utilizado	Pasante el tamiz N°4*
		Proctor Modificado

DESCRIPCIÓN	CONTROL DE DENSIDAD			
Volumen del Molde	cm ³	911.24	911.24	911.24
Peso del Molde	gr	4373.00	4373.00	4373.00
Peso Suelo Humedo + Molde	gr	6121.00	6327.00	6345.00
Peso del Suelo Humedo	gr	1748.00	1954.00	1972.00
Densidad del Suelo Humedo	gr/cm ³	1.92	2.14	2.16

DESCRIPCIÓN	CONTROL DE HUMEDAD							
Capsula No	No	B-01	B-02	T-110	T-111	T-001	T-002	T-034
Suelo Humedo + Capsula	gr	60.94	48.43	47.47	51.27	47.82	64.19	51.17
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr	54.28	43.55	42.20	45.40	41.85	57.10	44.30
Peso del Agua	gr	6.66	4.88	5.27	5.87	5.97	7.09	6.87
Peso de la Capsula	gr	13.94	13.52	13.10	13.40	12.95	22.43	14.05
Peso del Suelo Seco	gr	40.34	30.03	29.10	32.00	28.90	34.67	30.25
% de Humedad	%	16.51%	16.25%	18.11%	18.34%	20.66%	20.45%	22.71%
Promedio de Humedad	%	16.38%		18.23%		20.55%		22.61%
Densidad del Suelo Seco	gr/cm ³	1.648		1.814		1.795		1.598

RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD SECA



MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.83	gr/cm ³
ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	19.24%	

*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por las tesis, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones.

**Los ensayos fueron realizados por las tesis, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.



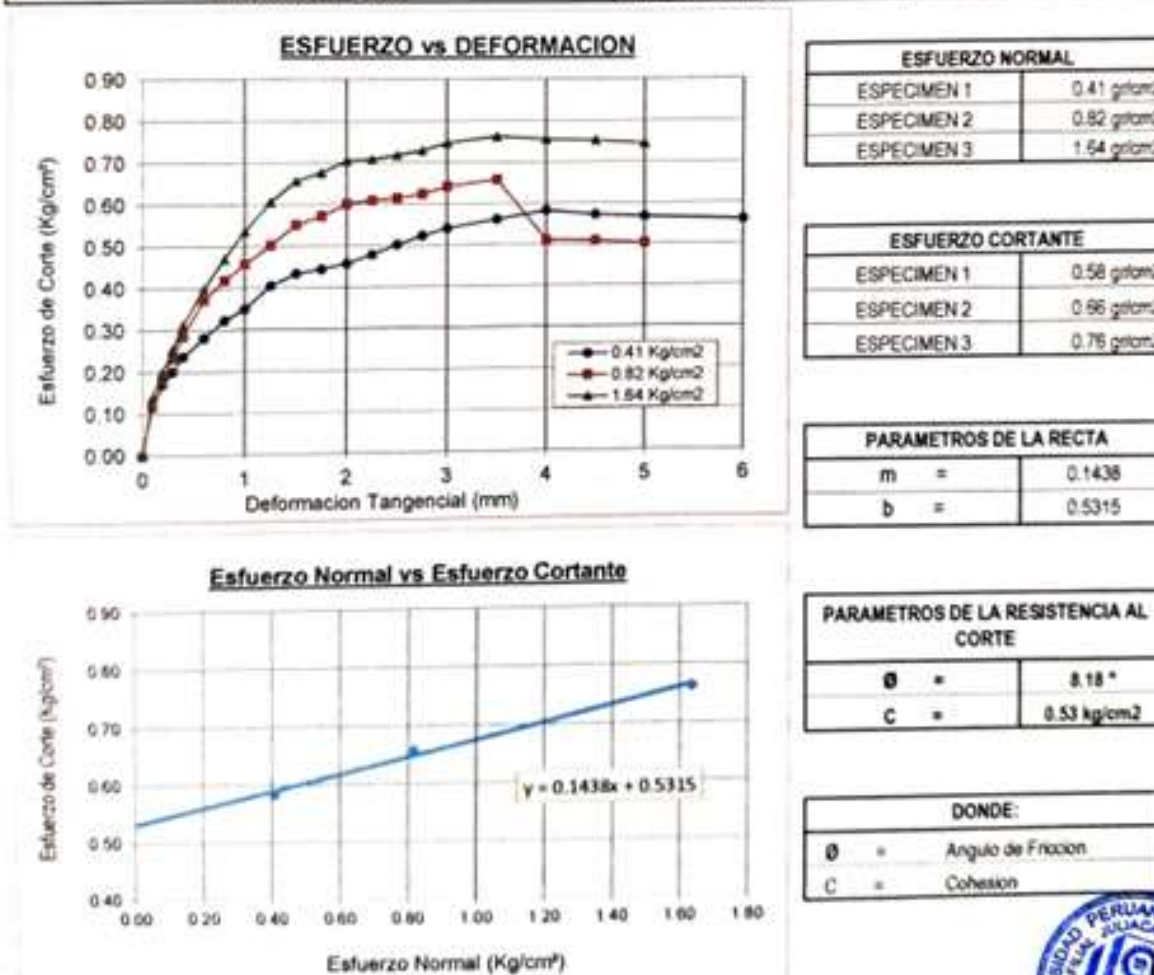
 UNIVERSIDAD PERUNA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS																					
TÍTULO DE TESIS		"Efecto de la goma sintética y microfibras de depósitos de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"																			
TESISTAS		Bach. Yuliana Hechale Poma y bach. Isela Nela Choque Perilla																			
Procedencia de muestra		Comunidad de Esquén Tenechi - Distrito de Juliaca																			
Descripción de muestra		Suelo natural																			
Fecha de ejec. Ensayo		29/05/2025				Estado de la muestra		Remoldeado													
ENSAYO: CORTE DIRECTO NORMA ASTM - D3080 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Prof. de la Muestra</td> <td>E-04 / 2.20m</td> </tr> <tr> <td>Maxima densidad seca</td> <td>1.80 g/cm³</td> </tr> <tr> <td>Maxima densidad húmeda</td> <td>2.09 g/cm³</td> </tr> <tr> <td>Óptimo contenido de humedad</td> <td>15.91%</td> </tr> <tr> <td>Clasificación SUCS</td> <td>CH</td> </tr> <tr> <td>Velocidad de Ensayo</td> <td>0.50 mm/min</td> </tr> </table>										Prof. de la Muestra	E-04 / 2.20m	Maxima densidad seca	1.80 g/cm ³	Maxima densidad húmeda	2.09 g/cm ³	Óptimo contenido de humedad	15.91%	Clasificación SUCS	CH	Velocidad de Ensayo	0.50 mm/min
Prof. de la Muestra	E-04 / 2.20m																				
Maxima densidad seca	1.80 g/cm ³																				
Maxima densidad húmeda	2.09 g/cm ³																				
Óptimo contenido de humedad	15.91%																				
Clasificación SUCS	CH																				
Velocidad de Ensayo	0.50 mm/min																				
DATOS	ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03														
Altura (cm)	2.12			2.12			2.12														
Diametro (cm)	4.99			4.99			4.99														
Area (cm ²)	19.56			19.56			19.56														
Volumen (cm ³)	41.54			41.54			41.54														
Peso anillo (gr)	141.30			141.30			141.30														
Peso anillo+muestra (gr)	227.06			228.05			227.59														
Peso Muestra (gr)	86.56			86.75			86.29														
Densidad Nat. (g/cm ³)	2.08			2.09			2.08														
carga vertical (kg)	8.00			16.00			32.00														
Est. Normal (Kg/cm ²)	0.41 Kg/cm ²			0.82 Kg/cm ²			1.64 Kg/cm ²														
Deformación Tang. (mm)	Lect. (N)	Fuerza Cortante (Kg)	Valores de Corte (kg/cm²)	Lect. (N)	Fuerza Cortante (Kg)	Valores de Corte (kg/cm²)	Lect. (N)	Fuerza Cortante (Kg)	Valores de Corte (kg/cm²)												
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00												
0.10	22.50	2.29	0.12	22.50	2.29	0.12	27.00	2.75	0.14												
0.20	33.00	3.36	0.17	34.50	3.52	0.18	38.50	3.92	0.20												
0.30	38.50	3.92	0.20	45.00	4.59	0.23	49.00	4.99	0.26												
0.40	45.50	4.64	0.24	55.00	5.61	0.29	60.00	6.12	0.31												
0.60	54.00	5.50	0.28	71.50	7.29	0.37	76.50	7.80	0.40												
0.80	62.00	6.32	0.32	80.50	8.21	0.42	90.50	9.23	0.47												
1.00	67.50	6.88	0.35	88.00	8.97	0.46	103.00	10.50	0.54												
1.25	78.00	7.95	0.41	96.50	9.84	0.50	116.50	11.88	0.61												
1.50	83.50	8.51	0.44	106.00	10.81	0.55	126.00	12.84	0.66												
1.75	85.50	8.72	0.45	110.00	11.21	0.57	130.00	13.25	0.68												
2.00	86.00	8.97	0.46	115.50	11.77	0.60	135.50	13.81	0.71												
2.25	92.00	9.38	0.48	117.00	11.93	0.61	136.00	13.86	0.71												
2.50	96.50	9.84	0.50	118.00	12.03	0.61	138.00	14.07	0.72												
2.75	100.50	10.24	0.52	120.00	12.23	0.63	140.00	14.27	0.73												
3.00	104.00	10.60	0.54	123.50	12.59	0.64	143.50	14.63	0.75												
3.50	108.00	11.01	0.56	126.50	12.90	0.66	146.50	14.93	0.76												
4.00	112.00	11.42	0.58	125.00	12.74	0.65	145.00	14.78	0.76												
4.50	110.00	11.21	0.57	124.50	12.69	0.65	144.50	14.73	0.75												
5.00	109.00	11.11	0.57	123.00	12.54	0.60	143.00	14.58	0.75												
6.00	107.50	10.96	0.56	121.50	12.38	0.60	141.50	14.42	0.74												
7.00																					
8.00																					
9.00																					
10.00																					
11.00																					

*Los ensayos fueron realizados por los tesisistas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.

**Se recomienda realizar una revisión y verificación adicional de los resultados obtenidos, considerando las características del suelo analizado, antes de utilizar el valor del ángulo de fricción y cohesión en el cálculo de la capacidad portante.



 UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS	
TÍTULO DE TESIS	"Efecto de la goma xanthan y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"
TESISTAS	Bach. Yulissa Hachalla Pomari y bach. Isela Nella Choque Peralta
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tariachi - Distrito de Juliaca
Descripción de muestra	Suelo natural
Fecha de ejm. Ensayo	23/05/2025
Estado de la muestra	Remoldeada
ENSAYO CORTE DIRECTO NORMA ASTM - D3080	
Prof. de la Muestra	E-04 / 2.25m
Maxima densidad seca	1.80 g/cm ³
Maxima densidad húmeda	2.09 g/cm ³
Óptimo contenido de humedad	15.91%
Clasificación SUCS	CH
Velocidad de Ensayo	0.50 mm/min.



*Los ensayos fueron realizados por los testistas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para la correspondiente certificación

**Se recomienda realizar una revisión y verificación adicional de los resultados obtenidos, considerando las características del suelo analizado, antes de utilizarlos para el cálculo de la capacidad portante del ángulo de fricción y cohesión en el cálculo de la capacidad portante



UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

TÍTULO DE TESIS	"Efecto de la goma xantén y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Jilisco para mejorar capacidad portante"		
TESISTAS	Bach. Yulissa Hechale Pomeri y bach. Isela Nela Choque Peralta		
Procedencia de muestra	Comunidad de Esques Tarachi - Distrito de Jilisco		
Descripción de muestra	Suelo natural + 1%goma xantén + 1.0% microfibras de depogonium		
Fecha de ejec. Ensayo	18/06/2025	Estado de la muestra	Remoldeado

ENSAYO: CORTE DIRECTO NORMA ASTM - D3080	Prof. de la Muestra	E-04 / 2.20m
	Maxima densidad seca	1.81 g/cm ³
	Maxima densidad húmeda	2.15 g/cm ³
	Óptimo contenido de humedad	18.78%
	Clasificación SUCS	CH
	Velocidad de Ensayo	0.50 mm/min

DATOS	ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03		
Altura (cm)	2.12			2.11			2.12		
Diámetro (cm)	4.99			4.99			4.99		
Área (cm ²)	19.56			19.53			19.56		
Volumen (cm ³)	41.54			41.54			41.54		
Peso anillo (gr)	141.30			141.30			141.30		
Peso anillo+muestra (gr)	230.62			230.60			230.61		
Peso Muestra (gr)	89.32			89.30			89.31		
Densidad Nat. (g/cm ³)	2.15			2.15			2.15		
carga vertical (kg)	8.00			16.00			32.00		
Est. Normal (Kg/cm ²)	0.41 Kg/cm ²			0.82 Kg/cm ²			1.64 Kg/cm ²		
Deformación Tang. (mm)	Lect. (N)	Fuerza Cortante (Kg)	Esfuerzo de Corte (kg/cm ²)	Lect. (N)	Fuerza Cortante (Kg)	Esfuerzo de Corte (kg/cm ²)	Lect. (N)	Fuerza Cortante (Kg)	Esfuerzo de Corte (kg/cm ²)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	16.50	1.89	0.08	21.50	2.19	0.09	25.50	2.60	0.10
0.20	29.50	3.01	0.12	36.00	3.67	0.15	46.50	4.74	0.19
0.30	39.50	4.03	0.16	48.00	4.99	0.20	65.00	6.63	0.27
0.40	50.00	5.10	0.20	59.50	6.07	0.24	79.50	8.10	0.33
0.60	63.50	6.47	0.26	75.00	7.65	0.31	97.00	9.89	0.40
0.80	73.00	7.44	0.30	87.50	8.92	0.36	109.00	11.11	0.45
1.00	82.50	8.41	0.34	101.50	10.35	0.42	120.00	12.23	0.49
1.25	96.00	9.79	0.39	115.00	11.72	0.47	135.00	13.76	0.55
1.50	106.50	11.06	0.44	129.50	13.20	0.53	147.50	15.04	0.60
1.75	119.00	12.13	0.49	138.50	14.12	0.57	159.00	16.21	0.65
2.00	126.50	13.10	0.53	148.50	15.14	0.61	167.50	17.07	0.69
2.25	137.50	14.02	0.56	157.50	16.06	0.65	178.50	18.20	0.73
2.50	149.00	15.19	0.61	168.00	17.13	0.69	189.50	19.32	0.78
2.75	159.50	16.26	0.65	177.50	18.09	0.73	197.50	20.13	0.81
3.00	169.00	17.23	0.69	187.50	19.11	0.77	206.00	21.00	0.84
3.50	183.50	18.71	0.75	201.00	20.49	0.82	221.50	22.58	0.91
4.00	192.50	19.60	0.75	214.50	21.87	0.88	230.00	24.36	0.98
4.50	195.50	19.91	0.76	205.00	20.90	0.84	250.50	25.54	1.03
5.00	172.50	17.58	0.71	195.50	19.93	0.80	238.00	24.26	0.97
5.50	159.50	16.26	0.65	183.00	18.65	0.75	227.50	23.19	0.93
6.00	147.00	14.98	0.60	172.00	17.53	0.71	217.50	22.17	
6.50									
7.00									
8.00									
9.00									

*Los ensayos fueron realizados por los testigos, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para la correspondiente certificación.

**Se recomienda realizar una revisión y verificación adicional de los resultados obtenidos, considerando las características del suelo analizado, antes de utilizar el valor del ángulo de fricción y cohesión en el cálculo de la capacidad portante.





UNIVERSIDAD PERUNA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

TÍTULO DE TESIS	"Efecto de la goma xanthan y microfibras de depogonium de la resistencia a la compresión no confinada de un suelo blando de Juliaca para mejorar capacidad portante"		
TESISTAS	Bach. Yulissa Hachalla Pomari y bach. Isela Nelia Choque Peralta		
Procedencia de muestra	Comunidad de Esquen Tariachi - Distrito de Juliaca		
Descripción de muestra	Suelo natural + 1%goma xanthan +1.0% microfibras de depogonium		
Fecha de ejec. Ensayo	18/06/2025	Estado de la muestra	Remoldeada

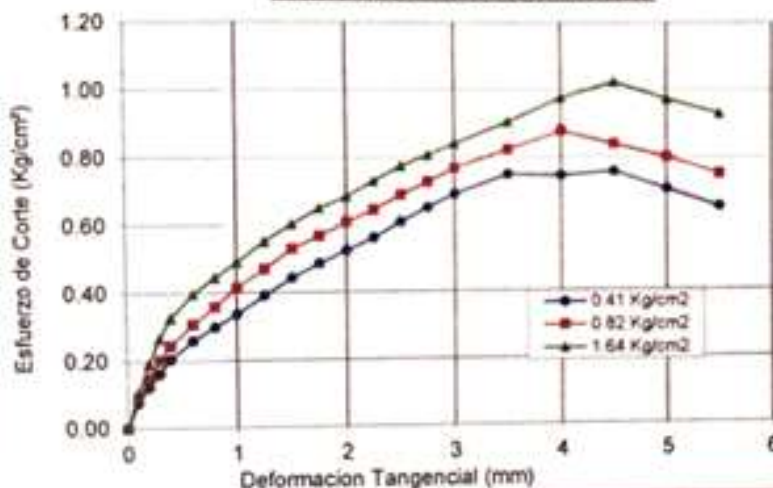
ENSAYO:

CORTE DIRECTO

NORMA ASTM - D3080

Prof. de la Muestra	E-04 / 2.20m
Maxima densidad seca	1.81 gr/cm ³
Maxima densidad húmeda	2.15 gr/cm ³
Óptimo contenido de humedad	18.78%
Clasificación SUCS	CH
Velocidad de Ensayo	0.50 mm/min.

ESFUERZO vs DEFORMACION



ESFUERZO NORMAL

ESPECIMEN 1	0.41 gr/cm ²
ESPECIMEN 2	0.82 gr/cm ²
ESPECIMEN 3	1.64 gr/cm ²

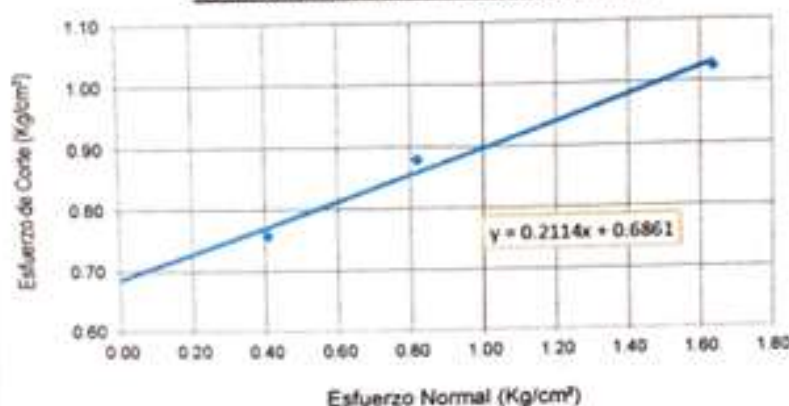
ESFUERZO CORTANTE

ESPECIMEN 1	0.76 gr/cm ²
ESPECIMEN 2	0.88 gr/cm ²
ESPECIMEN 3	1.03 gr/cm ²

PARAMETROS DE LA RECTA

m =	0.2114
b =	0.6861

Esfuerzo Normal vs Esfuerzo Cortante



PARAMETROS DE LA RESISTENCIA AL CORTE

θ =	11.94°
C =	0.69 kg/cm ²

DONDE:

θ =	Angulo de Friccion
C =	Cohesion

"Los ensayos fueron realizados por los tesisas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados por el personal del laboratorio, correspondiente certificación"

"Se recomienda realizar una revisión y verificación adicional de los resultados obtenidos, considerando las características del suelo analizado, antes de utilizarlos en el cálculo del ángulo de fricción y cohesión en el cálculo de la capacidad portante"

