

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**Análisis del xantano como impermeabilizador de suelos en la carretera Huaro**

**- Sullumayo, Quispicanchi, Cusco – 2025**

Asesor:

Mgt. Ing. Mamani Cutipa, Ambrocio

Autores:

Aroni Huamani, Gary Valentin

Quispe Valencia, Corali Mabel

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero(a) Civil

Cusco - Cusco - Perú

2025



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**

Acta N°: 014

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL**

En la ciudad de Cusco, a los 29 días del mes de Diciembre del 2025, siendo las 9:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 550-2025-UTEA-FC-FI-EPIC de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil \_\_\_\_\_, Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mg. Laime Calvo Edixon
Dictaminante:	Mg. Mendoza Morales German
Replicante :	Mg. Alvarez Alvarez Javier Francisco

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis       Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Análisis del xantano como impermeabilizador de suelos en la carretera Huaro – Sullumayo, Quispicanchi, Cusco - 2025

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: Aroni Huamani Gary Valentin

(Apellidos y Nombres)

Br.: Quispe Valencia Corali Mabel

(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) **APROBADO (S)**:

Por: Unanimidad

(Unanimidad o Mayoría) (\*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Br. Aroni Huamani Gary Valentin	Aprobado Notable
Br. Quispe Valencia Corali Mabel	Aprobado Notable

Siendo las 10:40 a.m horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mg. Laime Calvo Edixon  
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

Dictaminante: Mg. Mendoza Morales German  
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

Replicante: Mg. Alvarez Alvarez Javier Francisco  
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

(\*): Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban. Art.18 RGGAT.  
 (\*\*): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.




## 3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

### Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## Metadatos

<b>Datos de Autores</b>	
Apellidos y Nombres	: Aroni Huamani, Gary Valentin Quispe Valencia, Corali Mabel
Tipo de documento de identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 75786986 75994852
URL ORCID (opcional)	: <a href="https://orcid.org/0009-0007-3701-0869">https://orcid.org/0009-0007-3701-0869</a> <a href="https://orcid.org/0000-0002-6591-6621">https://orcid.org/0000-0002-6591-6621</a>
<b>Datos del Asesor</b>	
Apellidos y Nombres	: Mgtr. Mamani Cutipa, Ambrocio
Tipo de documento de identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: N°23894927
URL ORCID (opcional)	: <a href="https://orcid.org/0009-0005-6977-0294">https://orcid.org/0009-0005-6977-0294</a>
<b>Datos de Tesis</b>	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Civil
Línea de Investigación	: Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	: agosto 2025 – noviembre 2025
Fuente de financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de similitud	: 3%
URL de OCDE	: <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01</a>

## **Dedicatoria**

A mis padres, por sus sacrificios silenciosos, por su amor y paciencia. A mi hija, mi razón de ser y mi mayor motivación, espero que este trabajo te inspire a perseguir tus sueños, te adoro. A mi compañera de tesis, cómplice en esta travesía. A cada uno de ustedes, amigos quienes de una u otra forma me acompañaron en este proceso para lograr mis objetivos.

### **Gary Valentin Aroni Huamani**

A mis padres, Victoria y Mario por su guía celestial. A mis hermanos, Karen y Christian, por su constante compañía. Para mi compañero de tesis por todo el apoyo mutuo e incondicional. Y a mis amigos, por ser mis aliados en cada desafío y recordarme que el único límite es el cielo.

De manera especial, lo dedico también a la Ciencia y a la Ingeniería, con la esperanza de que este trabajo contribuya al desarrollo futuro de nuevas investigaciones que continúen expandiendo los límites del conocimiento.

### **Coralí Mabel Quispe Valencia**

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Mgtr. Ing Ambrocio Mamani Cutipa cuyo compromiso, guía experta fueron fundamentales para la realización de este trabajo. A mi familia, pilar fundamental de mi vida, gracias por su apoyo incondicional, por comprenderme en los momentos de ausencia y por ser mi fuente de motivación constante cuando las fuerzas flaqueaban. Finalmente, reconozco con orgullo el esfuerzo personal invertido en este proyecto. A todos, mi eterno agradecimiento.

### **Gary Valentin Aroni Huamani**

Agradezco profundamente al Ing. Ambrocio por su invaluable acompañamiento durante la elaboración de esta tesis, así como por su apoyo incondicional y su guía en cada etapa del proceso. A la vida, por enseñarme cosas tan bonitas y por mostrarme la belleza incluso en los momentos más desafiantes.

### **Coralí Mabel Quispe Valencia**

## Resumen

Evaluar el efecto del biopolímero Xantano como impermeabilizador y estabilizador de suelos en la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi, Cusco, determinando su influencia en la permeabilidad y resistencia del suelo. Se empleó un diseño experimental cuantitativo con muestras de suelo extraídas de tres calicatas. Se prepararon mezclas con concentraciones de Xantano al 0%, 3%, 5% y 7%, evaluándose mediante ensayos de permeabilidad por carga constante (Norma MTC E 906), Límites de Atterberg, Compactación Proctor Modificado y CBR (Norma MTC E 132). El análisis estadístico incluyó ANOVA de dos vías para determinar la significancia de los resultados.

El Xantano redujo significativamente la permeabilidad, con una disminución del 85,1% al 7% de concentración. El Índice de Plasticidad aumentó en un 94%, evidenciando mayor cohesión. La capacidad portante (CBR) mostró una mejora no significativa del 7,5% con 5% de Xantano. La densidad máxima seca no presentó cambios significativos, mientras que el contenido de humedad óptimo aumentó progresivamente.

El Xantano es un aditivo efectivo para la impermeabilización de suelos en subrasantes, con una dosificación óptima del 7%. No reduce la resistencia al corte, sino que incrementa la cohesión, posicionándose como una alternativa sostenible para la estabilización de caminos de bajo volumen de tránsito.

**Palabras clave:** Biopolímero, Goma Xantano, Permeabilidad del Suelo, Estabilización de Subrasantes, Carreteras de Bajo Volumen.

## **Abstract**

This study evaluated the effect of the biopolymer Xanthan Gum as a soil waterproofing and stabilizing agent on the Sullumayo road in Quispicanchi, Cusco, determining its influence on soil permeability and strength. A quantitative experimental design was used with silty-sandy soil samples extracted from three test pits. Mixtures were prepared with Xanthan Gum concentrations of 0%, 3%, 5%, and 7%, and evaluated through constant head permeability tests (Standard MTC E 906), Atterberg Limits, Modified Proctor Compaction, and CBR tests (Standard MTC E 132). Statistical analysis included a two-way ANOVA to determine the significance of the results.

Xanthan Gum significantly reduced permeability ( $p=0.002$ ), achieving an 85.1% decrease at the 7% concentration. The Plasticity Index increased by 94%, demonstrating enhanced soil cohesion. The bearing capacity (CBR) showed a non-significant improvement of 7.5% with 5% Xanthan Gum. The maximum dry density showed no significant changes, while the optimum moisture content progressively increased.

Xanthan Gum is an effective additive for soil waterproofing in subgrades, with an optimal dosage of 7%. It does not reduce shear strength but increases cohesion, positioning itself as a sustainable alternative for stabilizing low-volume roads.

**Keywords:** Biopolymer, Xanthan Gum, Soil Permeability, Subgrade Stabilization, Low-Volume Roads.

## Índice

Portada .....	i
Acta de sustentación .....	ii
Reporte de similitud .....	iii
Metadatos complementarios .....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Resumen .....	vii
Abstract.....	viii
Índice .....	ix
Índice de tablas .....	xi
Índice de figuras .....	xiii
Índice de anexos .....	xvi
<b>I. Introducción .....</b>	<b>17</b>
<b>II. Planteamiento del problema .....</b>	<b>18</b>
2.1 Descripción y formulación del problema .....	18
2.2 Objetivos.....	20
2.2.1 Objetivo general .....	20
2.2.2 Objetivos Específicos .....	20
2.3 Justificación e importancia .....	21
2.4 Limitaciones .....	23
2.5 Hipótesis .....	23
2.6 Variables .....	24

<b>III. Marco Teórico .....</b>	<b>26</b>
3.1 Antecedentes.....	26
3.2 Bases teóricas .....	33
3.3 Definición de términos .....	48
<b>IV. Metodología.....</b>	<b>53</b>
4.1 Tipo y nivel de investigación.....	53
4.2 Ámbito temporal y espacial.....	56
4.3 Población y muestra .....	59
4.4 Instrumentos .....	64
4.5 Procedimientos .....	70
4.6 Análisis de datos.....	101
4.7 Consideraciones éticas.....	111
<b>V. Resultados y discusión.....</b>	<b>112</b>
<b>VI. Conclusiones.....</b>	<b>131</b>
<b>VII. Recomendaciones.....</b>	<b>134</b>
<b>VIII. Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>136</b>
<b>IX. Anexos.....</b>	<b>141</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Matriz de Operacionalización de Variables.....	25
<b>Tabla 2</b> Coordenadas de Calicatas.....	56
<b>Tabla 3</b> Ubicación política de la Comunidad Campesina de Sullumayo.....	56
<b>Tabla 4</b> Distribución de Ensayos de Laboratorio por Calicata y Concentración de Xantano .....	62
<b>Tabla 5</b> Proporciones de Mezcla para la Dosificación de 0% Xantano .....	86
<b>Tabla 6</b> Proporciones de Mezcla para la Dosificación de 3% Xantano .....	87
<b>Tabla 7</b> Proporciones de Mezcla para la Dosificación de 5% Xantano .....	87
<b>Tabla 8</b> Proporciones de Mezcla para la Dosificación de 7% Xantano .....	88
<b>Tabla 9</b> Ensayos CBR - Calicata 1 .....	94
<b>Tabla 10</b> Ensayos CBR - Calicata 2.....	94
<b>Tabla 11</b> Ensayos CBR - Calicata 3.....	94
<b>Tabla 12</b> Tabla Promedio de Límites de Atterberg en función de la Concentración de Xantano .....	102
<b>Tabla 13</b> Incremento del Índice Plásticidad por Efecto del Xantano .....	103
<b>Tabla 14</b> Concentraciones de Xantano .....	104
<b>Tabla 15</b> Relación entre la Concentración de Xantano y el CBR Promedio.....	105
<b>Tabla 16</b> Efecto del Xantano en la Capacidad de Soporte del Suelo.....	106
<b>Tabla 17</b> Reducción de la Permeabilidad por Adición de Xantano.....	107
<b>Tabla 18</b> Reducción de la Permeabilidad con Diferentes Concentraciones de Xantano .	108
<b>Tabla 19</b> Parámetros base para el análisis económico .....	109
<b>Tabla 20</b> Costo del insumo Xantano por dosificación.....	110
<b>Tabla 21</b> Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías para el Índice de Plasticidad .....	112

<b>Tabla 22</b> Diferencia significativa respecto al control (Bonferroni).....	112
<b>Tabla 23</b> Análisis de varianza de dos vías para densidad máxima seca .....	114
<b>Tabla 24</b> Densidad Máxima Seca por Concentración de Xantano. ....	115
<b>Tabla 25</b> ANOVA del contenido de humedad óptimo. ....	117
<b>Tabla 26</b> Contenido de humedad óptimo por concentración. ....	117
<b>Tabla 27</b> Presenta los estadísticos descriptivos del CBR para cada combinación de los factores estudiados. ....	120
<b>Tabla 28</b> Análisis de varianza de dos vías para el CBR.....	120
<b>Tabla 29</b> Análisis de varianza de dos vías para permeabilidad .....	123
<b>Tabla 30</b> Estadísticos Descriptivos de Permeabilidad por Concentración de Xantano y Calicata.....	123

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Estructura química y síntesis de la unidad repetitiva del Xantano .....	37
<b>Figura 2</b> Para la Arena (Interacción de enlace) .....	38
<b>Figura 3</b> Para la Arcilla (Interacción de enlaces).....	38
<b>Figura 4</b> Carta de Plasticidad.....	46
<b>Figura 5</b> Flujograma de trabajo de Investigación .....	55
<b>Figura 6</b> Mapa político del Perú .....	57
<b>Figura 7</b> Mapa de la región del Cusco.....	57
<b>Figura 8</b> Localización del proyecto. ....	58
<b>Figura 9</b> Puntos de extracción de muestras .....	60
<b>Figura 10</b> Plano de Ubicación de Calicatas .....	61
<b>Figura 11</b> Excavación de Calicatas en la Carretera de Sullumayo .....	65
<b>Figura 12</b> Ensayo de Cono de Arena en situ.....	67
<b>Figura 13</b> Trazo de calicatas. ....	71
<b>Figura 14</b> Excavación de calicatas. ....	71
<b>Figura 15</b> Cuadro 4.1 de la MTC, para la exploración de suelos. ....	72
<b>Figura 16</b> Se muestra el equipo de Cono de Arena. ....	74
<b>Figura 17</b> Se evidencia el ensayo de cono de arena en Situ .....	74
<b>Figura 18</b> Pesado de muestra extraída para la densidad de campo.....	75
<b>Figura 19</b> Pesado de muestra antes de entrar al horno. ....	76
<b>Figura 20</b> Colocación de muestra en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ . ....	77
<b>Figura 21</b> Análisis Granulométrico .....	78
<b>Figura 22</b> Preparando los tamices con la muestra para el análisis granulométrico. ....	79
<b>Figura 23</b> Resultados del Tamizado.....	79
<b>Figura 24</b> Preparación del Ensayo de Límites de Atterberg .....	81

<b>Figura 25</b> Ejecución de la Ranura Estándar en el Ensayo de Límite Líquido.....	81
<b>Figura 26</b> Muestra Ranurada para el Ensayo de Límite Líquido.....	82
<b>Figura 27</b> Recipientes con Muestras para Límite Líquido y Plástico.....	82
<b>Figura 28</b> Proceso de Secado de Muestras de Límites de Atterberg .....	83
<b>Figura 29</b> Tamizado de las Muestras por el Tamiz 3/4" .....	84
<b>Figura 30</b> Preparación Inicial del Ensayo de Compactación.....	85
<b>Figura 31</b> Dosificación de Goma Xantana para los Ensayos Proctor.....	86
<b>Figura 32</b> Mezcla de Suelo con Goma Xantana .....	88
<b>Figura 33</b> Proceso de Compactación en el Ensayo Proctor Modificado .....	89
<b>Figura 34</b> Control de Calidad Post-Compactación: Pesaje y Muestreo .....	90
<b>Figura 35</b> Materiales Listos para el Ensayo de Soporte .....	91
<b>Figura 36</b> Hidratación de la Mezcla Suelo-Xantano .....	91
<b>Figura 37</b> Compactación Alta (55 golpes/capa) .....	92
<b>Figura 38</b> Compactación Media (26 golpes/capa).....	93
<b>Figura 39</b> Compactación Baja (12 golpes/capa).....	93
<b>Figura 40</b> Simulación de Sobrecargas de Terreno .....	95
<b>Figura 41</b> Ensayo de Expansión e Impermeabilización .....	96
<b>Figura 42</b> Proceso de Inmersión CBR.....	96
<b>Figura 43</b> Ensayo de Penetración CBR .....	97
<b>Figura 44</b> Preparación del Permeámetro de Carga Constante .....	98
<b>Figura 45</b> Permeabilidad en Suelo Estabilizado (7% Xantano) .....	98
<b>Figura 46</b> Determinación del Coeficiente de Permeabilidad.....	99
<b>Figura 47</b> Registro Preciso de Agua Percolada .....	100
<b>Figura 48</b> Gráfico de Plasticidad .....	101
<b>Figura 49</b> Carta de Clasificación SUCS para Análisis de Suelos.....	102

<b>Figura 50</b> Relación entre la concentración de Xantano y el Índice Plástico del suelo.....	105
<b>Figura 51</b> Relación entre la concentración de Xantano y el valor CBR del suelo .....	107
<b>Figura 52</b> Relación entre la concentración de Xantano y el coeficiente de permeabilidad del suelo.....	109
<b>Figura 53</b> Tendencia creciente del Índice de Plasticidad.....	113
<b>Figura 54</b> Efecto de la Concentración de Xantano en la Densidad Máxima Seca del Suelo .....	116
<b>Figura 55</b> Variación del contenido de humedad óptimo con la concentración de Xantano .....	118
<b>Figura 56</b> Presenta los resultados del CBR para las diferentes combinaciones experimentales evaluadas. ....	121
<b>Figura 57</b> Categorías de Sub rasante. ....	122
<b>Figura 58</b> Clasificación de Suelos por Grado de Permeabilidad.....	124
<b>Figura 59</b> Efecto de la Concentración de Xantano en la Permeabilidad del Suelo .....	125

## Índice de anexos

<b>Anexo 1.</b> Matriz de consistencia .....	142
<b>Anexo 2.</b> Validación de instrumentos .....	143
<b>Anexo 3.</b> Base de datos.....	145
<b>Anexo 4.</b> Calibración de equipos de laboratorio.....	241
<b>Anexo 5.</b> Formato de clasificación vehicular. ....	262
<b>Anexo 6.</b> Plano de ubicación y localización. ....	263
<b>Anexo 7.</b> Aplicación AXIS.CG. ....	264
<b>Anexo 8.</b> Panel fotográfico.....	265

## I. Introducción

La infraestructura vial en zonas rurales de Perú enfrenta serios desafíos debido a las características de sus suelos, particularmente en la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi, Cusco, donde la alta permeabilidad del terreno ha acelerado su deterioro, afectando la conectividad y el desarrollo local (Muñasqui Crisóstomo, 2023). Ante esta problemática, el presente estudio explora el uso del biopolímero Xantano como una opción sostenible para la estabilización de suelos, aprovechando su capacidad para formar una red polimérica que mejora la cohesión y reduce la filtración de agua (Jang, 2020). A través de una metodología experimental, se evaluaron cuatro concentraciones de Xantano (0%, 3%, 5% y 7%) en muestras obtenidas de tres calicatas, aplicando ensayos normalizados de permeabilidad, límites de Atterberg, compactación Proctor y CBR. Los resultados evidenciaron una reducción notable de la permeabilidad (85,1%) y un aumento significativo del índice de plasticidad (94%) con la dosis del 7% de Xantano, mientras la capacidad portante (CBR) registró una mejora moderada. Estos hallazgos respaldan la viabilidad del biopolímero como alternativa efectiva para la estabilización de subrasantes en vías de bajo tránsito.

## **II. Planteamiento del problema**

### **2.1 Descripción y formulación del problema**

La crisis de la infraestructura vial terciaria constituye un obstáculo para el desarrollo socioeconómico, una realidad que trasciende fronteras, pero cuyos efectos más severos se manifiestan en zonas rurales de países subdesarrollados. Esta problemática, lejos de ser únicamente técnica, es profundamente social y económica. En el ámbito colombiano, los datos revelan que el 25% de los ciudadanos tiene su residencia en la zona rural del país (García Toro, 2019, p. 14), la deficiencia de la red vial genera un círculo vicioso de la pobreza y exclusión, dificultando el transporte de productos, limitando el acceso a servicios básicos y frenando el progreso económico local. Esta descripción no es ajena a la realidad del Perú y de manera particularmente aguda, a la región del Cusco.

La problemática en el ambiente nacional se agrava considerablemente por la presencia de los suelos críticos. De acuerdo con (Muñasqui Crisóstomo, 2023), se distinguen por su elevada capacidad de retención de agua, su potencial de expansión y su reducida capacidad de soporte (p.1). Estos suelos, frecuentemente en la geografía andina, son el talón de Aquiles de la infraestructura vial. La permeabilidad del suelo emerge como la variable técnica central de esta crisis, actuando como el desencadenante primario de un proceso de deterioro acelerado. Un suelo permeable permite la infiltración de agua, saturando la subrasante y disminuyendo drásticamente su resistencia, lo que se traduce en

“deformaciones y grietas” (Muñasqui Crisóstomo, 2023, p. 2), que comprometen la integridad estructural del pavimento y la seguridad de los usuarios.

Es en este marco analítico donde se inserta la crítica situación de carretera Huaro - Sullumayo, en la provincia de Quispicanchi, Cusco. Esta vía es la línea de vida de la comunidad local, cuyo estado de severo deterioro es una manifestación física de las fallas estructurales en la gestión de la infraestructura rural. La alta permeabilidad del suelo de subrasante, agravado por las intensas precipitaciones propias de la zona, no es un simple inconveniente; es una causa raíz de un colapso progresivo. La infiltración de agua genera una pérdida sistemática de la capacidad portante materializándose en baches, grietas y el colapso de la superficie de rodadura. Las consecuencias trascienden lo técnico: se convierten en una barrera para el desarrollo humano. El tránsito vehicular se ve seriamente comprometido, impide el acceso a instituciones educativas y centros de salud, sino que también restringe la actividad comercial local, dificultando la comercialización de los productos agrícolas que sustentan la economía de la comunidad.

Es precisamente en este contexto donde la presente investigación adquiere su máxima relevancia, al buscar analizar la viabilidad del biopolímero Xantano como una alternativa innovadora y ambientalmente amigable para la impermeabilización del suelo. El objetivo es evaluar su capacidad para mejorar la durabilidad y la funcionalidad de la carretera a largo plazo, contribuyendo al progreso sostenible de la comunidad de Sullumayo.

### **2.1.1 Problema general**

**PG1.** ¿De qué manera la adición del Xantano afecta la permeabilidad y resistencia al corte del suelo en la carretera Huaro - Sullumayo, Quispicanchi – Cusco-2025?

### **2.1.2 Problemas Específicos**

**PE1.** ¿Qué relación existe entre la concentración del Xantano y la permeabilidad del suelo en la carretera Huaro - Sullumayo, Quispicanchi - Cusco-2025?

- PE2.** ¿Cómo varía la resistencia al corte de suelo en función de diferentes concentraciones de Xantano de la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi – Cusco-2025?
- PE3.** ¿Cuál es de la concentración óptima del Xantano para minimizar la permeabilidad de los suelos, considerando criterios técnicos de la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi – Cusco -2025?
- PE4.** ¿Cuál es la concentración óptima de Xantano para la resistencia al corte de los suelos, considerando los criterios técnicos de la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi - Cusco-2025?

## **2.2 Objetivos**

### **2.2.1 Objetivo general**

- OG1.** Determinar la influencia de Xantano en la permeabilidad y resistencia del suelo de la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi - Cusco-2025

### **2.2.2 Objetivos Específicos**

- OE1.** Determinar la relación entre la concentración del Xantano y la permeabilidad del suelo de la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi - Cusco-2025
- OE2.** Analizar la variación de la resistencia al corte del suelo con diferentes concentraciones de Xantano, en la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi - Cusco – 2025
- OE3.** Identificar la concentración óptima de Xantano que minimiza la permeabilidad del suelo considerando los criterios técnicos, en la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi - Cusco – 2025
- OE4.** Identificar la concentración óptima de Xantano que maximiza la resistencia al corte del suelo considerando criterios técnicos, en la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi, Cusco - 2025.

## **2.3 Justificación e importancia**

### **2.3.1 Justificación teórica**

La presente investigación se fundamenta en los principios de la mecánica de suelos no saturados junto a la hidrología de pavimentos, disciplinas que sostienen que la infiltración de agua es el principal agente de deterioro de la subrasante. La permeabilidad, determinada por la ecuación de Darcy, no es una propiedad estática, sino que puede ser alterada mediante la modificación de la microestructura del suelo (Fredlund et al, 2012, p. 331). En este marco, la biopolimerización emerge como una teoría para la estabilización de los suelos. Los biopolímeros, como el Xantano, no actúan como relleno inerte, sino que modifican activamente las propiedades mecánicas del suelo. De acuerdo con la revisión exhaustiva de (Jang, 2020, p. 5), el Xantano forma una matriz gel altamente viscosa que recubre las partículas del suelo, reduciendo los poros efectivos y aumentando las fuerzas de cohesión a través de mecanismos de puenteo e interacción electrostática. Por lo tanto, este estudio no se limita a una aplicación empírica; busca contribuir al cuerpo teórico de la geotécnica bioinspirada, validando en el contexto específico de los suelos andinos los mecanismos de fortalecimiento propuesta en la literatura internacional, estableciendo relaciones matemáticas entre la concentración del Xantano y variables críticas como la permeabilidad y la resistencia al corte.

### **2.3.2 Justificación Metodológica**

El rigor metodológico de esta investigación reside en un diseño Cuasi-experimental Cuantitativo que permite aislar y medir el efecto del Xantano con precisión, siguiendo protocolos estandarizados en geotecnia, se emplean ensayos de laboratorio reproducibles y cuantificables. La permeabilidad es determinada mediante el ensayo de carga constante, aplicando la Ley de Darcy, tal como lo describe (Das, 2021) en sus textos fundamentales de la mecánica de suelos. Esta aproximación metodológica rigurosa permite superar las

limitaciones de estudios meramente observacionales, generando datos robustos que no solo confirmaran o refutaran la hipótesis, sino que establecerán la curva de comportamiento dosis-respuesta del suelo tratado, un insumo para el diseño geotécnico.

### **2.3.3 Justificación Técnica**

Esta investigación se justifica técnicamente al abordar uno de los principales desafíos en la Ingeniería civil. La inestabilidad de las carreteras construidas sobre suelos con alta capacidad de infiltración. Para ello, se propone un avance significativo al utilizar el Biopolímero Xantano requerida para alcanzar la estabilidad del suelo, basándose en criterios técnicos rigurosos. De este modo, la presente tesis aportara una metodología y unos resultados que contribuyen al desarrollo de técnicas de estabilización más eficaces y sostenibles. El conocimiento generado servirá como una valiosa herramienta para el progreso y fortalecimiento de las redes viales, representando una contribución tangible al campo de la geotecnia y la ingeniería de pavimientos.

### **2.3.4 Justificación Social**

El estado de la carretera de Sullumayo no es un problema técnico aislado, sino una barrera tangible para el desarrollo humano de la comunidad. Su deterioro genera un círculo vicioso de aislamiento, pobreza y exclusión. La mejora de su estabilidad y transitabilidad, es el resultado esperado de esta investigación, teniendo un impacto social profundo y multifacético. Facilitando el acceso a los servicios de salud y educación, al mismo tiempo que disminuiría los gastos de transporte para los insumos y la producción del sector agrícola, dinamizando la economía local y aumentaría la seguridad vial para los habitantes.

### **2.3.5 Importancia de la Investigación**

La importancia de esta investigación de tesis, radica en su potencial para ser un puente entre la ciencia básica y la aplicación práctica, ofreciendo una solución concreta a un problema de desarrollo que aqueja a la comunidad de Sullumayo, al tiempo que contribuye

a la modernización geotécnica y a la sostenibilidad ambiental en el sector de la infraestructura del Perú.

## **2.4 Limitaciones**

### **2.4.1 Limitación social**

Durante el trabajo de campo se presentó una limitación social, ya que, a pesar de contar con la autorización del presidente de la comunidad campesina de Sullumayo y de los comuneros presentes, no se pudo realizar más de tres calicatas por lo que la investigación fue realizada en los kilómetros 9+000, 10+000 y 11+000 km aproximadamente. Algunos comuneros manifestaron su desacuerdo por considerar que más excavaciones afectarían sus terrenos, lo que limitó la posibilidad de ampliar la exploración y caracterización geotécnica a lo largo de toda la carretera, restringiendo el estudio al tramo crítico consensuado previamente.

## **2.5 Hipótesis**

### **2.5.1 Hipótesis General**

**HG1.** La adición del Xantano al suelo reduce significativamente su permeabilidad y resistencia, de la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi, Cusco – 2025.

### **2.5.2 Hipótesis Específicas**

**HE1.** A mayor concentración de Xantano, menor es la permeabilidad del suelo, en la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi, Cusco – 2025.

**HE2.** La resistencia al corte de suelo disminuye de manera significativa con el aumento de la concentración de Xantano, en la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi, Cusco – 2025.

**HE3.** La concentración óptima de Xantano minimiza la permeabilidad del suelo en 20% con respecto al suelo natural de la carretera Huaró - Sullumayo, Quispicanchi, Cusco – 2025.

**HE4.** La concentración óptima de Xantano maximiza la resistencia al corte del suelo en 20% con respecto al suelo natural de la carretera Huaro - Sullumayo, Quispicanchi, Cusco – 2025.

## **2.6 Variables**

### **2.6.1 Variable Independiente**

Concentración de Xantano: Producido a escala industrial mediante un proceso de fermentación que emplea cepas de *Xanthomonas campestris*, el biopolímero conocido como goma Xantano, se caracteriza por ser exopolisacárido. Su configuración molecular, definida por una espina dorsal de glucosa de la que se desprende cadenas laterales de trisacáridos con carga negativa, le confiere la categoría de polielectrolito. Es precisamente esta arquitectura la que explica su notable solubilidad en medio acuoso y su eficacia para producir soluciones de gran viscosidad incluso en porciones mínimas. (Aguilar et al., 2005, p. 52)

### **2.6.2 Variable dependiente**

Permeabilidad: La conductividad hidráulica saturada ( $k$ ) es una propiedad geotécnica fundamental que determina la facilidad con la que el agua puede fluir a través de la matriz de un suelo en condición de saturación total. Su cuantificación es crucial en el diseño y evaluación de obras de infraestructura, como terraplenes y capas de subrasante, dado que el inadecuado drenaje del agua suele ser un factor determinante en su falla (Das & Sobhan, 2018, p. 215).

Tabla 1.

## Matriz de Operacionalización de Variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
<b>Variable Independiente</b> <b>Concentración de Xantano</b>	Producido a escala industrial mediante un proceso de fermentación que emplea cepas de <i>Xanthomonas campestris</i> , el biopolímero conocido como goma Xantano, se caracteriza por ser exopolisacárido. Su configuración molecular, definida por una espina dorsal de glucosa de la que se desprende cadenas laterías de trisacáridos con carga negativa, le confiere la categoría de polielectrolito. Es precisamente esta arquitectura la que explica su notable solubilidad en medio acuoso y su eficacia para producir soluciones de gran viscosidad incluso en porciones mínimas. (Aguilar et al., 2005, p. 52)	Para los fines de esta investigación experimental, la variable "Concentración de Xantano" se define operativamente como la proporción en peso de polvo de goma Xantano aplicado en 0%, 3%, 5% y 7% disuelto en agua.	Concentración	% de Xantano	<b>Razón</b>
				Viscosidad	
				Tamaño de partícula	
				Apariencia	
			Caracterización	Contenido de humedad	
				Ph	
<b>Variable Dependiente</b> <b>Permeabilidad</b>	La conductividad hidráulica saturada (k) es una propiedad geotécnica fundamental que determina la facilidad con la que el agua puede fluir a través de la matriz de un suelo en condición de saturación total. Su cuantificación es crucial en el diseño y evaluación de obras de infraestructura, como terraplenes y capas de subrasante, dado que el inadecuado drenaje del agua suele ser un factor determinante en su falla (Das & Sobhan, 2018, p. 215).	La permeabilidad del suelo y su resistencia al corte se evaluará mediante tratamiento con Xantano. Cuya medición y observación se realizará mediante ensayos en laboratorio.	Permeabilidad del Suelo	Relación de Vacíos	<b>Razón</b>
				Tamaño de partículas	
				Estructura	
				Coefficiente de Permeabilidad Efectiva (ke).	
			Resistencia al Corte	Proctor Modificado	
				CBR	
			Factibilidad económica	Costo directo por m <sup>2</sup> de suelo tratado	

### III. Marco Teórico

#### 3.1 Antecedentes

##### 3.1.1 Antecedentes internacionales

De acuerdo con (Acevedo Zambrano & Ahumada Cabarcas, 2024, pp. 44-45), en su investigación “*Estimación de las ecuaciones que controlan la rigidez, resistencia mecánica y microestructura de un suelo fino estabilizado con goma de xantana y reforzado con fibras de polipropileno*”, su objetivo radica en introducir una técnica sustentable para el refuerzo de las arcillas, buscando sustituir particularmente la dependencia del cemento y el cal. La metodología empleada fue experimental, preparando 108 probetas con dosificación de Goma Xantana (GX) entre el 1% y 5% y las fibras de polipropileno de 0% y 0.5%, las propiedades se evaluaron a través de ultrasonido, pruebas de resistencia a la compresión simple y microscopía electrónica. Los resultados identificaron que la dosificación óptima fue de 5% de Goma Xantana y 0.5% de fibras a 90 días de curado, alcanzando valores de 1700 kPa de resistencia y 3250 Mpa de rigidez. El estudio concluyó que la Goma Xantana en dosis correctas forman una matriz biopolimérica que reduce la porosidad e incrementa significativamente el comportamiento estructural del suelo.

Según (Perez Duran & Serrano Sierra, 2024, pp. 72-74), en su investigación “*Análisis del comportamiento mecánico de un suelo fino mezclado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) y estabilizado con goma xantana*”, el objetivo fue analizar los efectos sinérgicos del Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP), y la Goma Xantana en un suelo fino. La metodología

consistió en fabricar probetas con 10%,20% y 30% de RAP y dosificaciones de GX de 0.5% a 2%, realizando ensayos de compresión, ultrasonido y microestructura. Los resultados demostraron que la combinación de 10% RAP y 1% GX a 28 días de curado fue la más efectiva, incrementando la resistencia entre 8% - 47%, y la rigidez entre 10% - 100%. Se concluyo que la Goma Xantana, en dosis controladas funciona como agente estabilizador eficiente para la mejora de las propiedades del suelo.

De acuerdo con (Mendonça et al., 2021, pp. 09-10), en su investigación “*A review on the importance of microbial biopolymers such as xanthan gum to improve soil properties*” el objetivo de su investigación se orientó en evaluar la viabilidad de la Goma Xanthan como una opción sustentable para la estabilización de los suelos mediante la técnica de bioclogging. La metodología consistió en la revisión sistemática de la literatura especializada, analizando investigaciones sobre la interacción suelo-biopolímero, las propiedades mecánicas, la permeabilidad y la durabilidad. El análisis reveló que este biopolímero puede reducir la permeabilidad del suelo hasta un 60% e incrementar su resistencia mecánica, debido a la formación de una matriz de hidrogel que obstruye los poros. La dosificación óptima se identificó entre 1% y 1.5% para la mayoría de suelos. Se llegó a la conclusión que la Goma Xanthan representa una alternativa viable, económica y competitiva, si bien se destaca la necesidad de profundizar en estudios sobre su desempeño a largo plazo bajo diversas condiciones ambientales.

Para (Soldo et al., 2020, pp. 09-11), en su investigación “*Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties*”, su objetivo se orientó a la creación una técnica ecológica de mejora de suelos, analizando de forma experimental la incidencia de diversos biopolímeros en sus propiedades mecánicas. Se utilizó la metodología experimental con suelo residual Piedmont (SW-SM), se prepararon especímenes con cinco biopolímeros (Goma Xanthan, Beta-Glucano, Goma Guar, Quitosano

y Alginato) en concentraciones de 1%, 2% y 4. Estos fueron evaluados con ensayos de compresión simple, tensión indirecta, triaxial no consolidado-no drenado y corte directo, bajo distintos periodos de curado, Los resultados determinaron que la Goma Xanthan, Goma Guar y el Beta-Glucano fueron los más efectivos. La resistencia del suelo aumento en relación directa con la concentración y el tiempo de curado, estabilizándose tras 5 días. Cabe destacar que la Goma Xanthan, con una concentración optima de 2%, triplico la cohesión y demostró una elevada durabilidad ante condiciones atmosféricas. El estudio concluye que los biopolímeros, en especial la Goma Xanthan, constituyen una alternativa viable y sostenible para la estabilización de suelos, al incrementar su cohesión y resistencia.

Para (Bagheri et al., 2023, pp. 1-12), en su artículo “*Effects of Xanthan Gum Biopolymer on Soil Mechanical Properties*”, el objetivo de su investigación se centró en evaluar el uso de la Goma Xanthan como un agente sostenible para mejorar las propiedades de un suelo limoso de baja plasticidad. Mediante un enfoque experimental que incluyo dosificaciones variables de Goma Xanthan en 0.5%, 1% y 2% y una serie de ensayos de laboratorio como la resistencia a la Compresión no Confinada (UCS), Triaxial consolidado no drenado (CU), límites de Atterberg, ciclos de humedecimiento-secado, pruebas de inmersión y análisis microestructural con SEM. Los resultados demostraron que el biopolímero incrementó la plasticidad y la resistencia a la compresión hasta 2.5 veces con el 2% de Goma Xanthan. Además, las tratadas mostraron mayor cohesión, durabilidad frente a los ciclos de humedad y reistencia al agua. La investigación concluye que la Goma Xantana es una alternativa ecológica y eficaz para la estabilización de suelos.

### **3.1.2 Antecedentes nacionales**

Para (Tejeira Berrios, 2024, p. 77), en su investigación “*Efecto de utilización de residuo avícola y biopolímero de fermentación bacteriana para mejorar las propiedades mecánicas y de impermeabilidad en suelos arenosos limosos como subrasante de*

*carreteras*”, el objetivo de su investigación se basó en evaluar las propiedades mecánicas e hidráulicas de un suelo arenoso limoso, destinado a subrasantes viales, mediante la aplicación combinada de un biopolímero como la Goma Xantana y residuos avícolas (plumas de pollo). La metodología utilizada fue de carácter experimental cuantitativo, implementando un diseño factorial 2k de Montgomery con 11 tratamientos replicados, donde se evaluaron y variaron las dosificaciones de plumas de pollo (0%, 0.1%, 0.25%, 0.4%, 0.5%) y de Goma Xantana (0%, 0.4%, 1%, 1.6%, 2%). Los resultados, obtenidos a través de los ensayos de compresión no confinada, CBR y ascensión capilar, y analizados con ANOVA y regresión lineal, demostraron que el 2% de Goma Xantana incremento la resistencia a la compresión no confinada hasta 4.53 MPa. La combinación sinérgica más efectiva fue de 0.5% de plumas y 2% de Goma Xantana, la cual optimizo el CBR y redujo drásticamente la absorción de agua por capilaridad. La investigación llego a la conclusión que la Goma Xantana es un elemento fundamental, al crear una matriz biopolimerica que incrementa la cohesión y reduce la permeabilidad, posicionándose como una alternativa sostenible para la estabilización de subrasantes.

Para (Achahuanco Silva & Huaman Ccorimanya, 2022, p. 22), en su investigación *“Uso de Xantano como material cementante suplementario de suelo cemento en la calle principal de Urpay, Quispicanchi, Cusco, 2021”*, su objetivo se centró en evaluar el potencial del biopolímero Xantano, como un agente cementante complementario para la estabilización del suelo en la vía principal de Urpay, Quispicanchi, Cusco. Mediante un diseño experimental, se fabricaron 18 especímenes de suelo limo-arcilloso, estabilizados con distintas proporciones de Xantano (1%, 1.25%, 2.5%) y cemento Portland (1%, 6%, 12%). Los especímenes fueron sometidos a ensayos de compresión simple, absorción de agua y ascensión capilar. Los resultados demostraron que una dosificación del 1% de Xantano incrementó la resistencia a compresión a 58.55 kg/cm<sup>2</sup>, superando significativamente al

suelo con 1% de cemento (12.15 kg/cm<sup>2</sup>). Asimismo, una dosificación del 2.5% de Xantano redujo la absorción de agua en un 6% y la ascensión capilar en un 71%. Se concluye que el Xantano es un aditivo efectivo y sostenible que puede reemplazar parcialmente al cemento, mejorando la resistencia y reduciendo la permeabilidad y capilaridad del suelo para aplicaciones viales.

Según (Huamani Mercado, 2022, pp. 50-52), en su investigación *“Incorporación de goma Xanthan para mejorar las propiedades de la subrasante limosa, calle Santa Eulalia, San Sebastián, Cusco – 2022”*, validada por la Universidad César Vallejo (Lima, Perú) el objetivo de su tesis se centró en evaluar el impacto del biopolímero goma Xanthan en las propiedades físico -mecánicas de una subrasante limosa. El estudio optó por un diseño cuasiexperimental con un enfoque cuantitativo y un nivel de la profundidad explicativa. Para ello, se analizaron muestras obtenidas de tres calicatas, las cuales fueron tratadas con diferentes concentraciones de Goma Xanthan: 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5%. Estas muestras fueron evaluadas mediante ensayos de granulometría, límites de consistencia, Proctor modificado y CBR, siguiendo los protocolos de la normativa ASTM. Los resultados identificaron que la dosificación del 1.0% era óptima, generando mejoras notables, el índice de plasticidad se incrementó de 5.87% a 21.77%, la densidad seca máxima pasó de 1.772 a 2.014 gr/cm<sup>3</sup>, y el valor del CBR incrementó un aumento del 133%, al pasar de 12.61% a 29.43%. Esta mejora permitió reclasificar el suelo de una subrasante de calidad “regular” a “muy buena”. La investigación concluye que la Goma Xanthan es una alternativa viable, económica y sostenible para la estabilización de suelo en proyectos de infraestructura vial.

(Morales Bautista, 2024, pp. 33-34), en su investigación *“Estabilización de suelo cohesivo de la subrasante en la avenida Yuracoto, mediante goma guar-xantana, Caraz, Ancash, 2023”*, el objetivo de su investigación se orientó en la estabilización de un suelo cohesivo de subrasante utilizando una combinación de los biopolímeros goma Guar y goma

Xantana en porcentajes de 0.75%, 1.5% y 2.5%. Con la finalidad de optimizar sus características físico - mecánicas. Los propósitos específicos consistieron en disminuir el índice de plasticidad, elevar la densidad seca máxima y analizar las fluctuaciones en el índice CBR. La metodología fue de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo con diseño experimental. Se utilizaron dos muestras de suelo (M-1 y M-2) de la Av. Yuracoto, las cuales fueron analizadas en su suelo natural y con aditivo mediante ensayos granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR. Los resultados demostraron que la proporción del 2.25% del biopolímero generó las mejoras más significativas, el índice de plasticidad se redujo en un más de 96% en ambas muestras, aproximándolas a un comportamiento no plástico. Asimismo, se incrementó la densidad seca máxima por encima de  $1.455 \text{ g/cm}^3$ , y el valor del CBR en la muestra M-2 mostró un aumento notable del 324.63%, llegando a un 40%. La investigación concluye que el uso de este biopolímero en una dosis del 2.25% constituye una estrategia eficaz para la estabilización de suelos cohesivos, ya que reduce su plasticidad, mejora su compactación y, fundamentalmente, incrementa su capacidad portante, optimizando el diseño del pavimento.

(Cruz Cruz, 2025, p. 63) en su investigación “*Incorporación del biopolímero goma guar en la subrasante de la carretera EMP PE-3S Combapata, tramo 3+000 A 6+000, Combapata, Cusco, 2024*”, validada por la Universidad Continental (Perú), el objetivo de su investigación fue evaluar el impacto de diferentes concentraciones de goma Guar con 1%, 1.5% y 2%, en las propiedades físico - mecánicas de un suelo arcilloso de subrasante. La metodología consistió en un enfoque experimental en el análisis de muestras obtenidas de 3 calicatas (C-1, C-2, C-3), sometiéndolos a ensayos de laboratorio normalizados ASTM, como el contenido de Humedad, los límites de Atterberg, compactación de Proctor Modificado, CBR y el coeficiente de permeabilidad. En los resultados se identificaron que la dosis del 1.5% fue la más eficaz, optimizando las propiedades del suelo, Con esta

dosificación, se registró un aumento de densidad seca hasta un  $1.896 \text{ g/cm}^3$ , mejoras en la capacidad de soporte CBR del 8.6%, y una disminución en la permeabilidad del  $0.00023 \text{ cm/s}$ . El incremento en la plasticidad del 21.18% evidenció una mayor cohesión aportada por el biopolímero, validando a la goma Guar como una alternativa sostenible para la estabilización de subrasantes, con un óptimo desempeño en 1.5% de su aplicación.

### 3.1.3 Antecedentes locales

(Tello Gonzales & Caviedes Oscco, 2022, pp. 45-46), en su investigación “*Influencia del biopolímero xantana en el mejoramiento de las propiedades de la subrasante en el tramo Cruzpampa-Huallak’ata en la C.C. Mask’a-Pisac-Cusco-2022*” el objetivo de esta investigación se centró en evaluar cuantitativamente el efecto del biopolímero Xantano sobre las propiedades mecánicas de una subrasante, contrastando su desempeño con el cemento Portland. La metodología utilizada es de carácter cuasiexperimental, explicativo y cuantitativo, procediendo a estabilizar muestras del suelo natural utilizando dos estabilizadores como la Goma Xantano en concentraciones de 0.5%, 1% y 2.5% y cemento en porcentajes de 8%, 10% y 12%. La caracterización mecánica e índice de las muestras se realizó mediante ensayos de Proctor modificado, CBR, Resistencia a la compresión simple y límites de Atterberg. Los resultados revelaron que la dosis óptima del Xantano fue del 1%, logrando una resistencia a la compresión de  $44.03 \text{ Kg/cm}^2$  y un índice de CBR de 64.9%. La investigación concluye que el Xantano mejora positivamente el comportamiento mecánico de la subrasante, posicionándose como una alternativa sostenible y eficiente para la estabilización de suelos finos, demostrando su máxima eficacia en dosis reducidas.

(Daza Rojas & Miranda Pino, p. 63), en su investigación “*Efecto de biopolímeros en las propiedades geotécnicas en suelos limosos aplicados a cimentaciones superficiales, distrito de San Sebastián, Cusco, 2022*”, el objetivo de su investigación fue analizar la influencia de los biopolímeros Goma Xantana, Agar y Gellan en las propiedades de cohesión

y densidad de un suelo limoso, destinados a cimentaciones superficiales en el área de APV. Alto Qosqo. La investigación empleó un enfoque experimental y cuantitativo con un diseño factorial  $2^3$  con puntos centrales, sometiendo las muestras a 27 ensayos de Proctor modificado y compresión Inconfinada (Norma ASTM) para tres concentraciones distintas de cada biopolímero con 0.00%, 0.75% y 1.5%. Los resultados demostraron un aumento sustancial de la cohesión con la Goma Xantana en  $0.1616 \text{ kgf/cm}^2$  y la goma Gellan  $0.1672 \text{ kgf/cm}^2$ , duplicando el valor del suelo natural  $0.0725 \text{ kgf/cm}^2$ . Sin embargo, la densidad del suelo no se vio afectada de manera significativamente por ninguno de los aditivos. La conclusión señala que estos biopolímeros incrementan la resistencia al corte en suelos limosos, ofreciendo una solución viable para la estabilización de las cimentaciones.

## **3.2 Bases teóricas**

### **3.2.1 Caracterización del Xantano**

#### **3.2.1.1 Viscosidad del Goma Xantano**

Este biopolímero, producido por *Xanthomonas campestris*, es un polisacárido aniónico de elevada masa molar, reconocido principalmente por sus funciones como agente espesante y estabilizante. Desde una perspectiva reológica, se caracteriza fundamentalmente por conferir una alta viscosidad a disoluciones acuosas, alcanzando esta propiedad a concentraciones notablemente bajas, lo que la hace sumamente eficiente. Esta alta viscosidad se debe a su estructura molecular de cadena rígida y ordenada en disolución, que genera una gran resistencia al flujo. Un comportamiento clave de la goma xantana es su marcada pseudoplasticidad (comportamiento "cizallo-adelgazante"), donde la viscosidad disminuye al aplicar una fuerza de corte, pero se recupera instantáneamente al cesar dicha fuerza, propiedad invaluable en aplicaciones donde se requiere fácil bombeo o aplicación seguido de una buena suspensión en reposo. Además, sus disoluciones son muy

estables ante variaciones de temperatura y pH, manteniendo su performance en un amplio rango de condiciones, lo que explica su uso extendido en industrias como la alimentaria (en salsas, aderezos y bebidas), la petrolera (en lodos de perforación) y la cosmética (Ramos Maldonado, 2020, pp. 33-34).

### **3.2.1.2 *Tamaño de partículas del Xantano***

Mediante la fermentación bacteriana de carbohidratos, llevada a cabo por *Xanthomonas campestris*, se sintetiza la goma xantana, un biopolímero de considerable masa molecular. Se distingue por su notable solubilidad en agua, propiedad que mantiene tanto a temperatura ambiente como en caliente, y por la capacidad de producir soluciones altamente viscosas incluso a bajas concentraciones (Carmona, 2015, como se cita en Herrera Cahuana & Roque Raffo, 2025, p. 16). En su presentación en polvo, el tamaño de partícula es un parámetro crucial para su correcta dispersión e hidratación, especificándose que el 100% pasa a través de una malla 60 y el 95% a través de una malla 80, lo que garantiza una funcionalidad óptima (Herrera Cahuana & Roque Raffo, 2025, p. 86). Sus soluciones son altamente pseudoplásticas, lo que mejora las características sensoriales del producto final, y son notablemente estables frente a variaciones de pH, temperatura y presencia de sales (Sharma, 2011, como se cita en Herrera Cahuana & Roque Raffo, 2025, pp. 17-18). Debido a estas propiedades, En el sector alimentario, se emplea masivamente como espesante, estabilizante y modulador de textura en una gama de productos que incluye salsas, helados, bebidas y panificación. Su cualidad de poseer una granulometría uniforme permite una hidratación inmediata y previene la aparición de grumos.

### **3.2.1.3 PH del Xantano**

La goma Xantano es un heteropolisacárido de origen microbiano, producido por la bacteria *Xanthomonas campestris* como un polímero de protección. Según (Badui Dergal, 2006, p. 102), su configuración molecular está integrada por unidades de D-glucosa, D-manosa y ácido D-glucurónico en una proporción molar de 2.8:3.2, con una masa molecular promedio de 3,000,000 Da e incluye grupos acetilo y piruvato. Entre sus características fisicoquímicas más significativas destaca la capacidad de generar soluciones acuosas altamente viscosas con fluidez no newtoniana, manteniendo estabilidad en un amplio espectro de pH (1-9) y en medios salinos. Asimismo, presenta solubilidad inmediata en agua a diferentes temperaturas, resistencia a enzimas degradativas y efecto sinérgico con gomas como las galactomananas. Este conjunto de atributos justifica su uso extendido en la industria alimentaria como agente espesante y estabilizante en aderezos, salsas, bebidas, lácteos y frutas procesadas, bajo la categoría de aditivo permitido dentro de las buenas prácticas de fabricación.

### **3.2.1.4 Contenido de Humedad de Xantano**

La cuantificación del agua presente en la goma Xantana líquida es un parámetro crítico para garantizar su calidad y desempeño en fluidos de perforación base agua. Según (Davila Gomez, 2016, p. 43), en su tesis profesional desarrollada en el Instituto Politécnico Nacional de México, la metodología para este fin consiste en secar una muestra de 4 gramos de goma Xantana en una estufa a 105 °C durante 2 horas, seguido de un enfriamiento en desecador y el pesado de la masa residual. logrando una cuantificación más exacta y confiable del contenido de humedad.

### **3.2.1.5 Apariencia del Xantano**

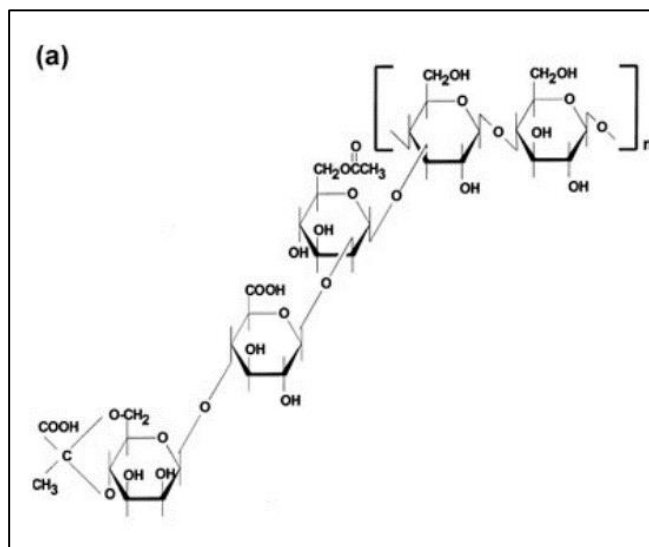
La goma xantana, un biopolímero de extenso uso en la industria de alimentos por sus versátiles propiedades, se comercializa en estado purificado como un polvo blanco o crema que simplifica su manipulación e identificación. Entre sus atributos más relevantes destaca una elevada solubilidad, disolviéndose con eficacia en agua a cualquier temperatura, lo que agiliza su integración uniforme en distintas mezclas. Asimismo, el aditivo posee una excepcional tolerancia a ambientes severos, conservando su funcionalidad ante altas temperaturas y fluctuaciones de acidez, cualidades que amplían su utilidad en numerosos productos alimenticios y cosméticos. (Zhang et al., como se citó en Vertiz Sosaya, 2023, p. 2).

### **3.2.1.6 Composición química del Xantano**

El xantano es un biopolímero polisacárido producido por *Xanthomonas campestris*, cuya estructura química única determina su interacción con los suelos. Posee un esqueleto principal de  $\beta$ -D-glucopiranososa unido por enlaces (1 $\rightarrow$ 4), similar a la celulosa, del cual se ramifica, en cada dos unidades ( $C_{35}H_{49}O_{29}$ ), una cadena lateral trisacárida compuesta por  $\alpha$ -D-manopiranososa,  $\beta$ -D-ácido glucurónico y una segunda  $\alpha$ -D-manopiranososa modificada con un grupo piruvato (4,6-O-piruvil) y frecuentemente acetilada en la posición 6 (Chang et al., 2015). Esta estructura confiere al Xantano su carácter aniónico, alta viscosidad y estabilidad. En suelos, los grupos carboxilo ( $-COO^-$ ) del ácido glucurónico y del piruvato, junto con los hidroxilos ( $-OH$ ) de los azúcares, forman enlaces de hidrógeno y puentes electrostáticos con las superficies cargadas de las partículas de arcilla, mientras que, en arenas, su cadena polimérica larga y ramificada forma redes físicas que envuelven y cementan las partículas inertes.

## Figura 1

*Estructura química y síntesis de la unidad repetitiva del Xantano*



**Nota.** La imagen describe la estructura y formación del xantano: (a) se muestra su configuración molecular, donde una cadena principal de glucosa (similar a la celulosa) presenta ramificaciones compuestas por tres azúcares —manosa, ácido glucurónico y manosa modificada—, estas últimas portando grupos acetilo (Ac) y piruvato (Pyr). Adaptado de Becker et al. (1998). Fuente: (Jacobs, 2014, p. 18)

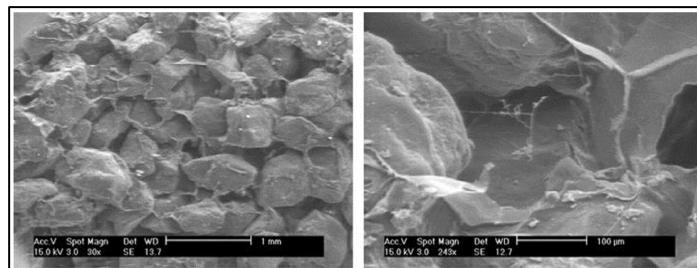
### 3.2.1.7 Mecanismos de Interacción del Xantano en Suelos

El Xantano actúa como un agente cementante en suelos mediante interacciones moleculares diferenciadas según el tipo de partículas. En suelos arenosos (partículas gruesas y eléctricamente neutras), el Xantano forma matrices fibrosas o textiles que recubren las partículas y llenan los espacios porosos, mejorando la cohesión principalmente a través de la resistencia mecánica de la propia matriz de biopolímero, la cual se endurece por deshidratación (Chang et al., 2015, p. 67). En suelos arcillosos (partículas finas con superficies cargadas eléctricamente), el Xantano interactúa directamente mediante enlaces de hidrógeno y puentes electrostáticos entre sus grupos carboxilo (-COOH) e hidroxilo (-OH) y las

superficies de las partículas finas, formando matrices rígidas de Xantano-arcilla que actúan como aglutinantes. En suelos bien gradados (mezcla de partículas gruesas y finas), como el suelo natural y el suelo rojo amarillo, se combinan ambos mecanismos: las matrices de Xantano-arcilla cementan las partículas arenosas, mientras que la fricción entre partículas gruesas sinergiza el efecto fortalecedor, logrando la mayor eficacia en la mejora de resistencia (Chang et al., 2015, p. 68).

## Figura 2

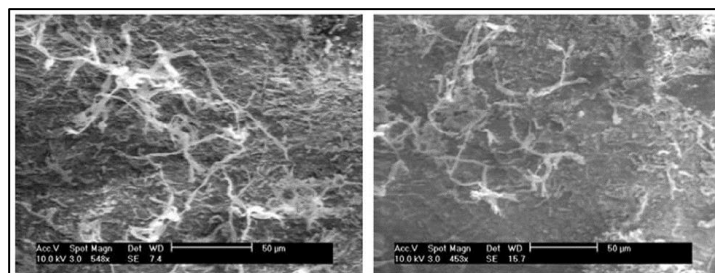
*Para la Arena (Interacción de enlace)*



**Nota.** Como se observa en la micrografía SEM de la arena tratada en la (Figura 2a en Chang et al., 2015), el Xantano no se adhiere químicamente a las partículas neutras, sino que forma una red o matriz fibrosa. Fuente: (Chang et al., 2015)

## Figura 3

*Para la Arcilla (Interacción de enlaces)*



**Nota.** Se muestra la imagen SEM de la arcilla tratada (Fig. 2c en Chang et al., 2015) revela una interacción directa y molecular, entre los grupos funcionales del biopolímero (-COOH, -OH) y la superficie de las arcillas. Fuente: (Chang et al., 2015)

### **3.2.1.8 *Porcentaje de Xantano en suelos***

El biopolímero conocido como Xantano, sintetizado por la bacteria *Xanthomonas campestris*, es ampliamente reconocido por sus aplicaciones como agente espesante en sectores como el alimenticio, farmacéutico y cosmético. Esto se debe a sus notables propiedades reológicas y a su habilidad para generar geles estables bajo diversas condiciones de pH y temperatura (Chang et al., 2015, citado en Tello & Caviedes, 2022). En el ámbito de la ingeniería civil, su utilización se ha extendido a la mejora de suelos. La incorporación de este biopolímero en proporciones reducidas, que oscilan entre el 0.5% y el 2.5%, ha evidenciado mejoras significativas en las características mecánicas del terreno. Dichas mejoras se reflejan en un aumento de la resistencia a la compresión, un mayor valor de CBR (Capacidad de Soporte California) y una densidad seca superior. Este material actúa como un agente cementante no tóxico y ecológico (Tello & Caviedes, 2022, p. 38), cuya eficacia radica en su capacidad para reforzar la cohesión intermolecular de las partículas del suelo. De esta manera, el Xantano se posiciona como una alternativa sostenible frente a los aglomerantes tradicionales, como el cemento.

## **3.2.2 Suelo**

### **3.2.2.1 *Definición de suelo***

El suelo es una capa superficial dinámica y viva de la Tierra, constituida por una mezcla compleja de materia orgánica, minerales, agua, aire y una gran diversidad de organismos vivos, donde interactúan elementos naturales y se producen intercambios continuos de materia y energía. Funciona como un ecosistema fundamental que sustenta la vida, proporciona nutrientes y agua a las plantas, filtra el agua y sirve de hábitat para la biodiversidad. Se considera un recurso no renovable

a escala humana debido a los miles de años que requiere su formación. (Jaramillo J., 2002)

### **3.2.2.2 *Estabilidad de Suelos***

En el ámbito de la ingeniería geotécnica, la estabilización de suelos constituye una técnica clave para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de un suelo, con el objetivo de elevar su capacidad de carga y garantizar su durabilidad, especialmente en proyectos viales. Según (Castro Diaz & Juarez Chuquista, 2024, p. 20), este proceso implica "la cohesión de sus partículas genera una reorganización de la microestructura que se traduce en una mejora de la resistencia y la durabilidad ". El Manual de Carreteras del MTC (2014, como se citó en Castro Diaz & Juarez Chuquista, 2024, p. 20) establece que mediante técnicas de estabilización que pueden ser físicas, mecánicas o químicas, es posible incrementar las capacidades mecánicas de un suelo, requiriendo a menudo el uso de aditivos y un posterior proceso de compactación para superar las deficiencias propias de cada tipo de suelo.

### **3.2.2.3 *Relación de Vacíos en suelos***

La estructura de un suelo está compuesta por partículas sólidas que dejan espacios libres o poros entre ellas. Estos espacios, denominados vacíos, pueden contener agua, aire o ambos. Para caracterizar cuantitativamente esta disposición interna, se emplea la relación de vacíos, un índice adimensional fundamental que se calcula comparando el volumen total de vacíos con el volumen ocupado exclusivamente por los sólidos. Este parámetro se vincula directamente con la porosidad del suelo y es un indicador clave de su densidad y tipo. Por ejemplo, los suelos granulares presentan valores típicos entre 0.9 (estructura suelta) y 0.35 (estructura densa), mientras que en suelos cohesivos la variación es mayor, pudiendo superar valores de 5 en suelos altamente compresibles (Portilla Yandún, 2021, p. 21).

**Volumen total (V):**

$$V = V_s + V_v$$

**Donde:**

- $V$  = Volumen total de la muestra de suelo.
- $V_s$  = Volumen de los sólidos.
- $V_v$  = Volumen de vacíos.

**Composición del volumen de vacíos (Vv):**

$$V_v = V_w + V_a$$

**Donde:**

- $V_w$  = Volumen de agua en los vacíos.
- $V_a$  = Volumen de aire en los vacíos.

**Relación de Vacíos (e):**

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

**Donde:**

- $V_s$  = Volumen de los sólidos.
- $V_v$  = Volumen de vacíos.

**Porosidad (n):**

$$n = \frac{V_v}{V}$$

**Donde**

- $V$  = Volumen total de la muestra de suelo.
- $V_v$  = Volumen de vacíos.

**Relación entre Porosidad (n) y Relación de Vacíos (e):**

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

\*y\*

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

### 3.2.2.4 *Gradiente Hidráulico*

El gradiente hidráulico es una variable fundamental en el análisis de la infiltración de agua en el suelo, ya que cuantifica la tasa de pérdida de energía hidráulica a lo largo de la trayectoria de flujo. Su cálculo se basa en la diferencia de carga hidráulica entre dos puntos y la distancia que los separa. Este concepto es la base de la ley de Darcy, la cual establece que, para un flujo laminar a través de un medio poroso, la velocidad de descarga es directamente proporcional al gradiente hidráulico. Esta relación lineal es válida para materiales como arenas y limos, pero no se cumple en suelos muy permeables o con flujo turbulento, donde se requieren enfoques matemáticos más complejos (Caceres Mendoza, 2024, p. 39).

#### **Ley de Darcy (Forma fundamental):**

$$V = k \cdot i$$

Donde:

V = Velocidad de descarga o velocidad aparente

k = Coeficiente de permeabilidad del suelo

i = Gradiente hidraulico

#### **Gradiente Hidráulico (i):**

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_1 - H_2}{L}$$

Donde:

- $H_1, H_2$  = Carga hidráulica total en los puntos 1 y 2
- L = Longitud de la trayectoria de flujo entre los puntos

### 3.2.3 *Coefficiente de permeabilidad del suelo*

El coeficiente de permeabilidad es una propiedad esencial de un suelo que define cuán fácilmente puede fluir el agua a través de sus poros sin alterar su estructura. Esta propiedad es la constante de proporcionalidad en la Ley de Darcy, que vincula el caudal de filtración con el gradiente hidráulico y el área de flujo. Su valor, típicamente expresado en centímetros por segundo, varía significativamente dependiendo de factores como la distribución del tamaño de partículas, la compacidad del suelo y la temperatura del agua. Este coeficiente es determinante en geotecnia para clasificar los suelos (desde altamente permeables hasta prácticamente impermeables) y para diseñar obras como presas, donde controla el volumen de filtraciones, las presiones bajo la estructura y los riesgos de inestabilidad (López Zapana, 2018, pp. 16, 61).

#### **Formulación de la Ley de Darcy (para determinar Q):**

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

#### **Donde:**

- $Q$  = Caudal o gasto de filtración
- $k$  = Coeficiente de permeabilidad
- $i$  = Gradiente hidráulico
- $A$  = Área transversal total al flujo

**Fórmula para calcular el Coeficiente de Permeabilidad (k):** Despejado de la Ley de Darcy.

$$k = \frac{Q}{i \cdot A}$$

#### **Donde:**

- $k$  = Coeficiente de permeabilidad
- $Q$  = Caudal o gasto de filtración
- $i$  = Gradiente hidráulico

- $A$  = Área transversal total al flujo

### **3.2.3.1 Resistencia al corte de suelos**

La resistencia al corte en suelos cohesivos constituye una propiedad física de gran complejidad, influenciada por múltiples variables interdependientes como la humedad, las condiciones de drenaje, la velocidad de aplicación del esfuerzo y la metodología de ensayo empleada (Taylor, 1961, citado en Díaz Marín, 2023, p. 26). Su determinación se realiza mediante pruebas tanto de campo como de laboratorio. El Ensayo de Penetración Estándar (SPT), estandarizado en la NTP 339.133, consiste en un método "in situ" que cuantifica la resistencia del terreno mediante el hincado de un muestreador con un martillo de 63.5 kg que cae desde 76 cm, registrando el número de golpes "N" requeridos para penetrar 30 cm; este valor se correlaciona posteriormente con parámetros de resistencia al corte (Díaz Marín, 2023, pp. 32-34). Complementariamente, el Ensayo de Compresión Simple (NTP 339.167) representa una prueba de laboratorio ágil que se ejecuta en suelos cohesivos mediante la aplicación de carga axial progresiva sobre muestras cilíndricas sin confinamiento lateral hasta alcanzar la falla. La relevancia de estos métodos reside en que el SPT posibilita una exploración expedita del terreno, mientras que la compresión simple proporciona una cuantificación directa de la resistencia en condiciones controladas, resultando crucial establecer correlaciones entre ambos enfoques para optimizar las investigaciones geotécnicas en proyectos de ingeniería.

### **3.2.3.2 Proctor Modificado**

La estabilidad de los suelos es un principio fundamental en la ingeniería civil para garantizar la durabilidad y seguridad de las obras de infraestructura. Una de las metodologías clave para lograr esta estabilidad es la compactación, proceso mediante el cual se aumenta la densidad del suelo al reducir sus vacíos, mejorando así su

resistencia y capacidad de carga mientras se minimizan los asentamientos y deformaciones futuras (Porta Rutte, 2023, p. 40). El Ensayo Proctor Modificado es un procedimiento de laboratorio estandarizado crucial en la mecánica de suelos, utilizado para estudiar y controlar la compactación del suelo. Su objetivo principal es determinar la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo que un suelo puede alcanzar cuando se compacta con una energía específica, con el fin de aumentar la resistencia, disminuir las deformaciones y evitar asentamientos futuros en obras de infraestructura.

### **3.2.3.3 CBR**

El ensayo California Bearing Ratio (CBR) constituye una metodología esencial en el diseño de pavimentos, empleada para evaluar la capacidad soporte de terrenos compactados en terraplenes, bases granulares y explanadas. Este procedimiento estandarizado por la norma ASTM D-1883 implica la compactación de muestras en moldes normalizados, su saturación controlada en agua, y la aplicación de carga progresiva mediante un pistón estándar a velocidad constante. El índice CBR, expresado porcentualmente, cuantifica la relación entre la presión necesaria para penetrar el material analizado y la requerida en un material de referencia bajo idénticas condiciones de penetración. Conforme al Manual de Carreteras del MTC (2018), los suelos con  $CBR < 3\%$  se clasifican como subrasantes inadecuadas, mientras que valores  $\geq 10\%$  indican aptitud para construcción, siendo este parámetro determinante en el dimensionamiento estructural del pavimento (Samame Zatta, 2021, p. 87).

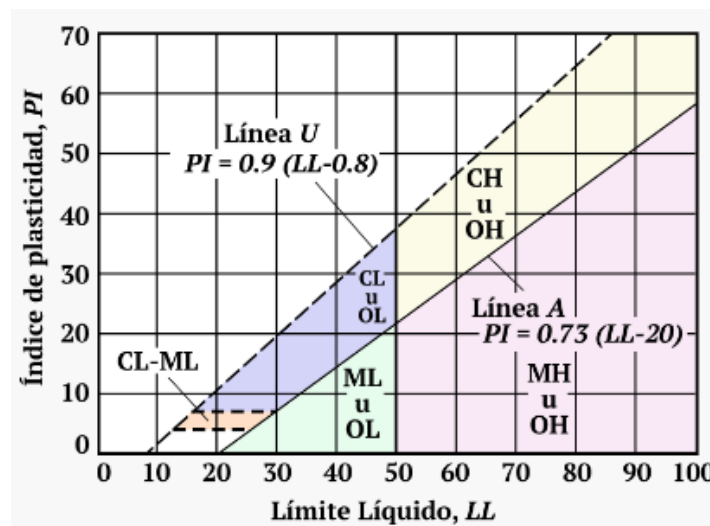
### **3.2.3.4 Límites De Atterberg**

Los Límites de Atterberg son puntos de referencia que miden el contenido de humedad de un suelo en tres transiciones clave de consistencia. El Límite de

Contracción es el porcentaje de humedad en el que el suelo deja de comportarse como un sólido y pasa a un estado semisólido, perdiendo su volumen al secarse. Cuando el suelo pierde más humedad y cambia de un estado semisólido a uno plástico (donde puede moldearse sin agrietarse), ese contenido de agua específico se denomina Límite Plástico. Finalmente, el Límite Líquido es el contenido de humedad en el que el suelo pasa de un estado plástico a un estado fluido o líquido. (Das B. , Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, 1985).

**Figura 4**

*Carta de Plasticidad*



*Nota.* Se muestra la carta de Plasticidad para determinar el Índice de Plasticidad presentado por (Das B. M., 2013) Fuente: (Daza Rojas & Miranda Pino, 2024).

### 3.2.4 Análisis de varianza de dos vías

También denominada ANOVA de dos factores, es una técnica estadística que permite evaluar simultáneamente el efecto de dos variables independientes, llamadas factores, sobre una variable dependiente continua, analizando tanto los efectos principales de cada factor como la interacción entre ellos. Esta metodología, fundamentada en el trabajo de Ronald A. Fisher, descompone la variabilidad total de los

datos en componentes atribuibles a cada factor, a su interacción y al error residual, utilizando el estadístico F para determinar la significancia estadística. Requiere que se cumplan supuestos como la normalidad de los residuos, la homocedasticidad y un diseño balanceado con igual número de observaciones por combinación de factores, siendo especialmente útil en diseños experimentales donde se busca entender la influencia conjunta de dos tratamientos o condiciones sobre una respuesta medida. (Dagnino S., 2014, p. 309)

### **3.2.5 El método de Bonferroni**

El ajuste de Bonferroni constituye una estrategia metodológica empleada en el contexto de análisis estadísticos que involucran múltiples comparaciones. Su principio fundamental radica en la modificación del nivel de significancia estadística, el cual se recalcula dividiendo el valor alpha convencional entre el número total de pruebas realizadas. Esta corrección tiene como propósito principal controlar la tasa de falsos positivos que surge naturalmente cuando se ejecutan numerosas pruebas de hipótesis sobre un mismo conjunto de datos. Aunque esta metodología ofrece un control riguroso sobre los errores de tipo I, su naturaleza conservadora puede reducir la capacidad para identificar efectos verdaderamente existentes, incrementando potencialmente los errores de tipo II. Su aplicación resulta particularmente pertinente en diseños de investigación con comparaciones específicas predefinidas en la fase de planeación metodológica (Dagnino S., 2014, p. 311)

### **3.2.6 Factibilidad económica**

La viabilidad económica representa una etapa fundamental en el proceso de inversión pública. Su propósito es evaluar si un proyecto, al llevarse a cabo, generará un beneficio real para la comunidad, asegurando que los recursos públicos siempre limitados se destinen de manera justificada y con impacto social positivo.

En Perú, este análisis se guía por el Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones (SNPMGI), desde el cual el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) y las entidades sectoriales, como el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), definen los métodos y criterios para diseñar y evaluar este tipo de iniciativas (MTC, 2023).

### 3.2.7 Costo directo por suelo tratado

Dentro del presupuesto de una obra vial, uno de los rubros más importantes es la estabilización del terreno, sobre todo cuando se usan materiales especiales como el biopolímero Xantano. Saber cuánto cuesta estabilizar cada metro cúbico de suelo es clave para decidir si esta tecnología resulta económicamente viable. Para obtener esa cifra, es necesario tomar en cuenta todo lo que directamente se usa o consume en el proceso: los materiales, mano de obra y equipos directamente imputables a la operación de estabilización (MTC, 2023).

### 3.3 Definición de términos

- **Acetilo:** Grupo de átomos específico que forma parte de la estructura química del Xantano. Su estructura molecular está formada por 3 átomos de hidrógeno, 2 de carbono y 1 de oxígeno.
- **Ácido D-glucurónico:** Tipo de molécula de azúcar con características ácidas, derivado de la glucosa, que actúa como un componente fundamental en la estructura ramificada del Xantano.
- **Bacteria (*Xanthomonas campestris*):** Microorganismo vivo utilizado en un proceso industrial de fermentación para producir de manera natural el biopolímero Xantano.

- **Bioclogging:** Método de observación que consiste en obstruir los poros del suelo usando materiales de origen biológico (como biopolímeros), reduciendo significativamente el paso del agua y aumentando la impermeabilidad.
- **Biopolímero:** Molécula grande y pesada (polímero) producida por un ser vivo. El Xantano es un biopolímero porque lo segrega la bacteria *Xanthomonas campestris*. Actúa como una "red" o "esponja" natural que atrapa agua y una partículas.
- **CBR (California Bearing Ratio):** Este método de medición en geotecnia determina qué tanta carga puede soportar un suelo. Cuando el resultado del CBR es alto, significa que el terreno posee mayor firmeza y resistencia., capaz de soportar cargas pesadas sin deformarse, lo cual es importante para el diseño de carreteras.
- **Cohesión:** Es la unión o fuerza interna de "pegado" que mantiene unidas las partículas de un suelo. Un suelo con alta cohesión es más estable y menos propenso a la erosión o al desmoronamiento.
- **D-glucosa:** Molécula de azúcar simple y común que forma la "columna vertebral" o estructura central del biopolímero Xantano, producido por la bacteria *Xanthomonas campestris*.
- **D-manosa:** Se produce mediante la fermentación bacteriana de *Xanthomonas campestris*, generando un tipo distinto de azúcar molecular, que forma parte esencial de las ramificaciones laterales de la estructura del Xantano.
- **Ensayo de carga constante/variable:** Pruebas de laboratorio estandarizadas que miden cuán rápido fluye el agua a través de una muestra de suelo para calcular con precisión su coeficiente de permeabilidad (k).
- **Ensayo de compresión simple (UCS):** Es un método mecánico que determina la resistencia mediante la aplicación de fuerzas crecientes sobre una muestra de suelo hasta provocar su falla estructural, con el fin de medir su resistencia máxima.

- **Fermentación:** Proceso bioquímico controlado (como el utilizado para hacer yogurt o cerveza) en el que microorganismos (como bacterias o levaduras) transforman un nutriente (como el azúcar) en productos deseados. En este caso, la bacteria *Xanthomonas campestris* fermenta carbohidratos para producir el Xantano.
- **Galactomananos:** Grupo de polisacáridos, de la familia de biopolímeros naturales (como la Goma Guar) que a veces se usan en combinación con el Xantano para la estabilización de suelos.
- **Gradiente hidráulico:** Es la relación de la pérdida de carga hidráulica "pendiente" o diferencia de presión que impulsa al agua a filtrarse a través del suelo. Se puede imaginar como la inclinación de una tubería: a mayor inclinación (gradiente), más rápido fluye el agua.
- **Medios porosos:** Es un material que contiene huecos o espacios vacíos (poros) entre sus partículas sólidas. El suelo es un medio poroso clásico, donde los poros pueden estar llenos de aire o agua.
- **Mecanismos de puenteo:** Son procesos o fenómenos por el cual las largas cadenas del biopolímero (Xantano) forman "puentes" físicos que conectan partículas de suelo distantes entre sí, incrementando la resistencia y cohesión del conjunto.
- **Parámetros reológicos:** Conjunto de propiedades que describen cómo fluye y se deforma un material ya sea la "viscosidad", "elasticidad" y rigidez. Para el Xantano, el parámetro clave es su comportamiento pseudoplástico.
- **Permeabilidad (k):** Es una propiedad física que cuantifica la facilidad con la que un suelo o medio poroso permite el flujo de un fluido a través de su estructura. Un suelo permeable (k alta) como la arena deja pasar el agua fácilmente, mientras que uno impermeable (k baja) como la arcilla compacta, no.

- **Polímero:** Producido por *Xanthomonas campestris*, este biopolímero de cadena larga, constituido por numerosas subunidades monoméricas, se utiliza eficazmente como espesante y estabilizante.
- **Proctor Modificado:** un procedimiento normalizado de compactación con energía regulada, se determinan los parámetros fundamentales de un suelo, su contenido de humedad ideal y su peso unitario seco máximo. Esta información es vital para el control de calidad durante la edificación de terraplenes y las capas de sub-base en obras de infraestructura vial.
- **Pseudoplástico:** Propiedad reológica de algunos fluidos que se vuelven menos viscosos y más líquidos cuando se agitan o someten a un esfuerzo como cortar o mezclar, pero recuperan su espesor original en reposo.
- **Relación de vacíos:** Es una medida de la ingeniería geotécnica, como un valor numérico que representa la proporción de espacios vacíos respecto al volumen de partículas sólidas en un suelo, reflejando directamente su grado de compactación.
- **Resistencia al corte:** Es la propiedad de un material para oponerse a fuerzas externas que buscan producir una deformación irreversible en su estructura. Es una medida fundamental de la estabilidad del terreno.
- **Subrasante:** Capa de terreno natural, preparada y compactada, que sirve de base o cimentación sobre la cual se construyen las capas de la carretera. Su calidad es crítica para la durabilidad del pavimento.
- **Viscosidad:** Un fluido de alta viscosidad es espeso y pegajoso (como la miel), mientras que uno de baja viscosidad es fluido como el agua. El Xantano aumenta drásticamente la viscosidad del agua.

- **Exopolisacárido:** Un exopolisacárido es un tipo de azúcar complejo (un polímero de carbohidratos) que es producido y liberado al exterior por un microorganismo, como una bacteria o un hongo.
- **Hidrofílica:** Una sustancia hidrofílica es aquella que tiene afinidad por el agua, es decir, que atrae y se mezcla fácilmente con ella. Esto le da la capacidad de disolverse en agua y de absorberla con facilidad.

## IV. Metodología

### 4.1 Tipo y nivel de investigación

#### 4.1.1 Tipo de investigación

La presente investigación se enmarca dentro del enfoque Cuantitativo, ya que se basa en la medición numérica de las variables de estudio y el análisis estadístico de los datos obtenidos experimentalmente. Según (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018), este enfoque permite “responder al planteamiento del problema mediante la medición numérica de variables, la implementación de un protocolo experimental preestablecido y el procesamiento estadístico de la información” (pp. 6-7). En este estudio, se cuantificaron variables como la permeabilidad, resistencia al corte (CBR), límites de Atterberg y parámetros de compactación, con el fin de establecer relaciones objetivas entre la concentración de Xantano y el comportamiento del suelo.

#### 4.1.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación es:

- **Explicativo:** Constituye el nivel central de la investigación, orientado a establecer relaciones de causa-efecto entre la adición de Xantano y las propiedades geotécnicas del suelo. Mediante el uso de ANOVA de dos vías, se buscó explicar cómo y por qué el biopolímero modifica el comportamiento del en estudio suelo.

### 4.1.3 Diseño de Investigación

El estudio siguió un diseño Cuasi-experimental, apropiado para investigaciones donde no es posible la asignación aleatoria de los sujetos o unidades de estudio, pero sí se puede manipular la variable independiente. Este diseño se caracterizó por:

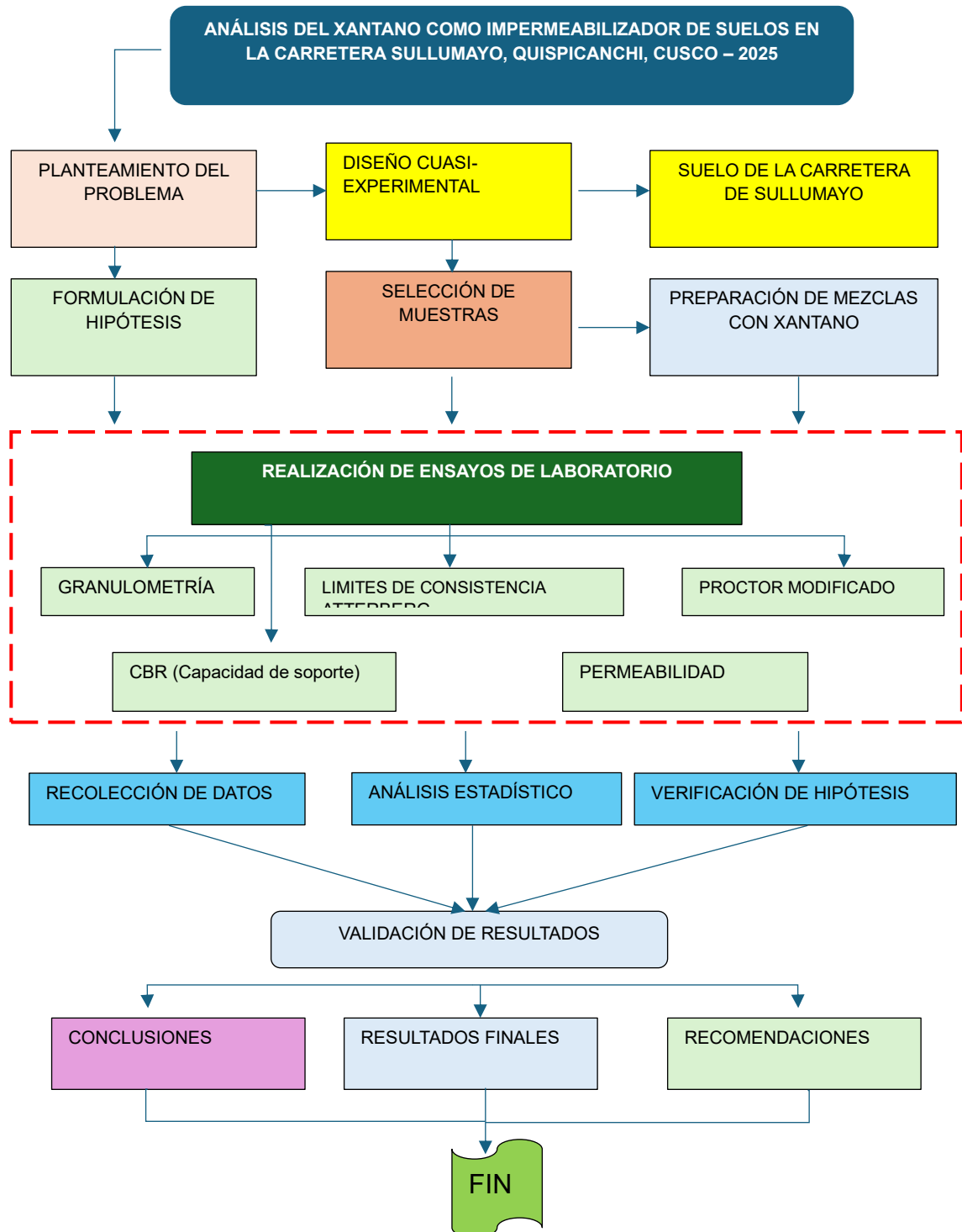
- **Manipulación activa de la variable independiente:** Se aplicaron cuatro concentraciones de Xantano (0%, 3%, 5% y 7%) a muestras de suelo procedentes de tres calicatas (C1, C2, C3).

De acuerdo con la revisión bibliográfica, para (Huamani Mercado, 2022), (Daza Rojas & Miranda Pino, 2024) y (Chang, Im, Prasadhi, & Cho, 2015) las dosificaciones de goma Xantano usadas para obtener los mejores resultados se encuentran entre el 1.5% y el 2.5%. No obstante, para este estudio se decidió emplear proporciones superiores (3%, 5% y 7%) con el fin de evaluar de manera más amplia su influencia en la reducción de la permeabilidad del suelo.

- **Grupos intactos:** Las muestras se obtuvieron de calicatas preexistentes en la carretera de Sullumayo, las cuales conformaron grupos naturales no aleatorizados.
- **Control experimental:** Se mantuvieron constantes los procedimientos de ensayo (normas MTC y ASTM), las condiciones de laboratorio y los equipos utilizados, con el fin de aislar el efecto del Xantano y minimizar la influencia de variables extrañas.
- **Mediciones repetidas:** Cada muestra fue evaluada en su estado natural (grupo control: 0% de Xantano) y luego con las diferentes concentraciones del biopolímero (grupos de tratamiento), lo que permitió comparar los efectos antes y después del tratamiento.

Figura 5

## Flujograma de trabajo de Investigación



## 4.2 **Ámbito temporal y espacial**

### 4.2.1 **Ámbito temporal**

La investigación se realizó durante el año 2025. En donde se recopiló información bibliográfica, análisis de antecedentes, recolección de muestras, ensayos de laboratorio, interpretación de resultados y la elaboración del informe final.

### 4.2.2 **Ámbito espacial**

El estudio se realizó en la carretera de la Comunidad Campesina de Sullumayo, ubicada en el distrito de Huaró, provincia de Quispicanchi, departamento de Cusco, Perú. Esta vía constituye la principal vía de comunicación terrestre de la comunidad.

**Tabla 2**

*Coordenadas de Calicatas*

Calicata	Norte	Este	Elevación
C-1	212227.81	8479090.28	4317 msnm
C-2	212275.56	8478060.06	4301 msnm
C-3	212149.65	8477392.92	4213 msnm

*Nota.* Se presenta cuadro de coordenadas de la ubicación de las diferentes calicatas.

**Tabla 3**

*Ubicación política de la Comunidad Campesina de Sullumayo*

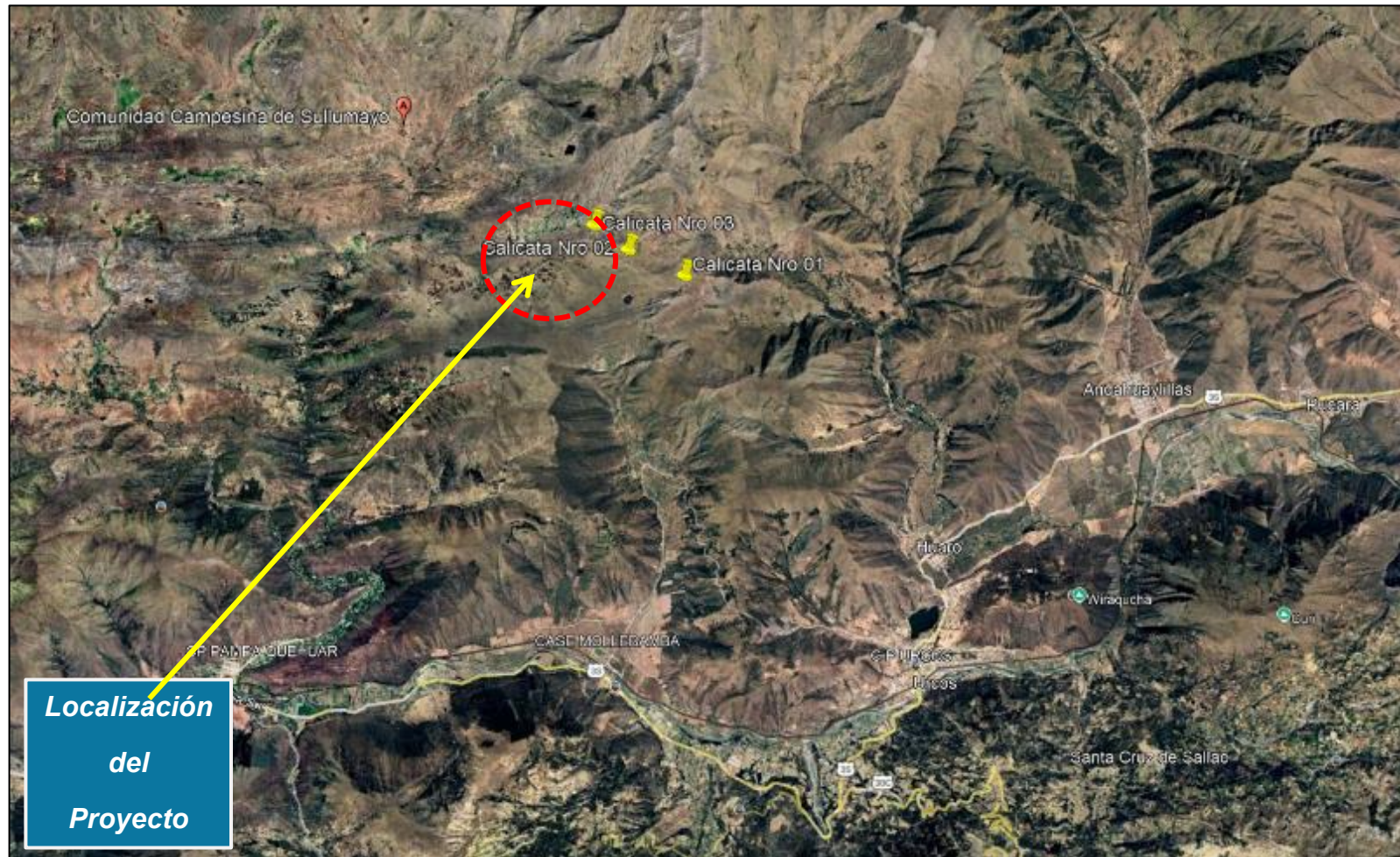
<b>Descripción</b>	<b>Nombre</b>
Comunidad	Sullumayo
Provincia	Quispicanchi
Departamento	Cusco
Región	Cusco

*Nota.* Se muestra la ubicación política. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6***Mapa político del Perú**Nota.* Elaboración con Software de Autodesk**Figura 7***Mapa de la región del Cusco**Nota.* Elaboración con Software de Autodesk

**Figura 8**

Localización del proyecto.



*Nota.* Esta imagen presenta la localización del proyecto dentro de la comunidad de Sullumayo.

### **4.3 Población y muestra**

#### **4.3.1 Población**

La población de estudio está constituida por el tramo crítico de la carretera de la Comunidad Campesina de Sullumayo, ubicada en el distrito de Huaró, provincia de Quispicanchi, Cusco. Este tramo presenta problemas de infiltración y deterioro acelerado debido a las características del suelo.

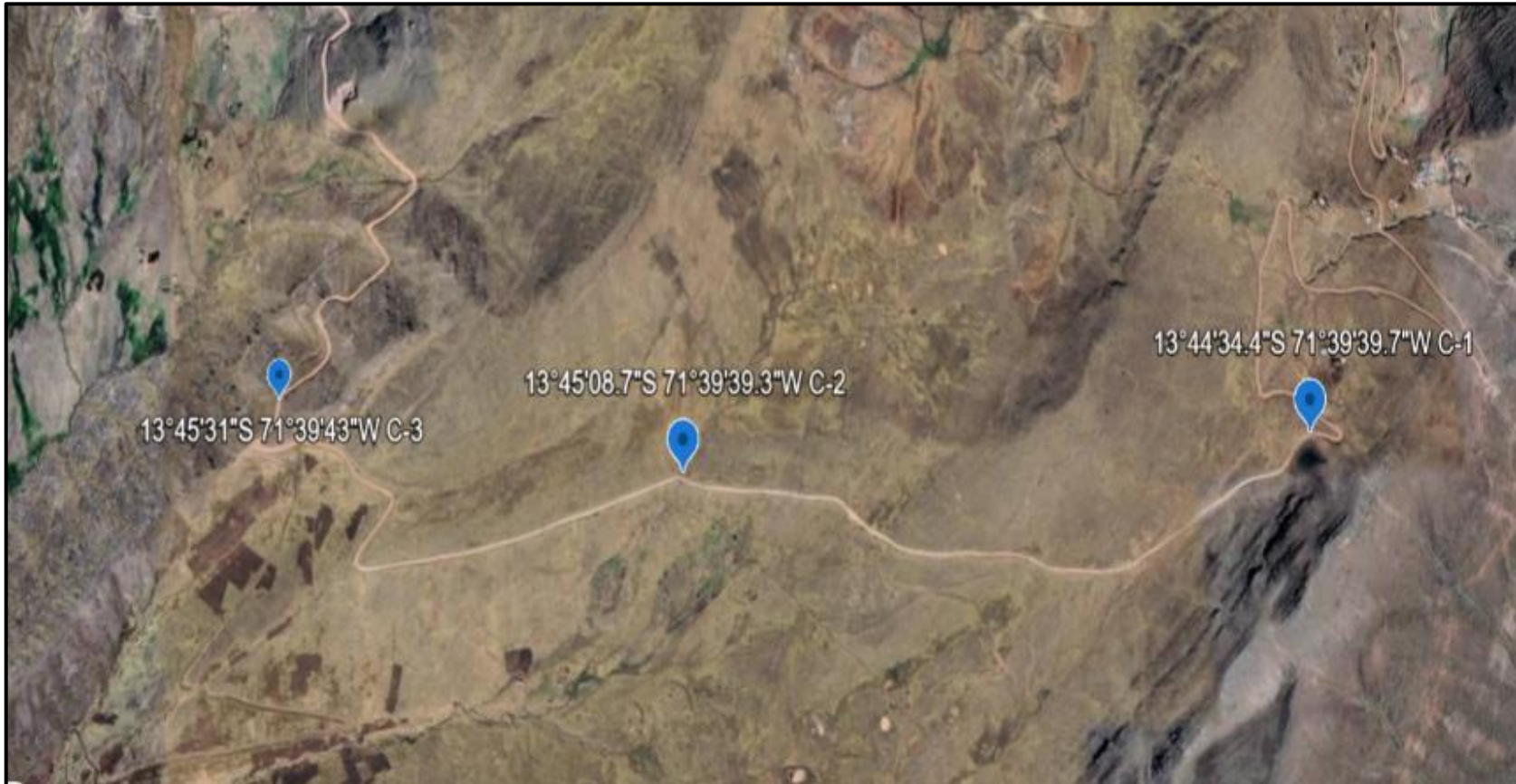
#### **4.3.2 Muestra**

Se seleccionaron tres puntos de muestreo (calicatas) de manera no aleatoria, en los tramos más críticos identificados entre los progresivos 09+000 km y 11+000 km de la carretera de acceso a Sullumayo. La ubicación de cada calicata se determinó mediante inspección visual y criterio técnico, priorizando zonas con evidencias de erosión, saturación y pérdida de capacidad portante.

De acuerdo con el Manual de Carreteras del MTC (2014), para carreteras de bajo volumen de tránsito ( $IMDA \leq 200$  veh/día), se requiere un mínimo de una calicata por kilómetro, con una profundidad de 1.50 m respecto al nivel de la subrasante.

**Figura 9**

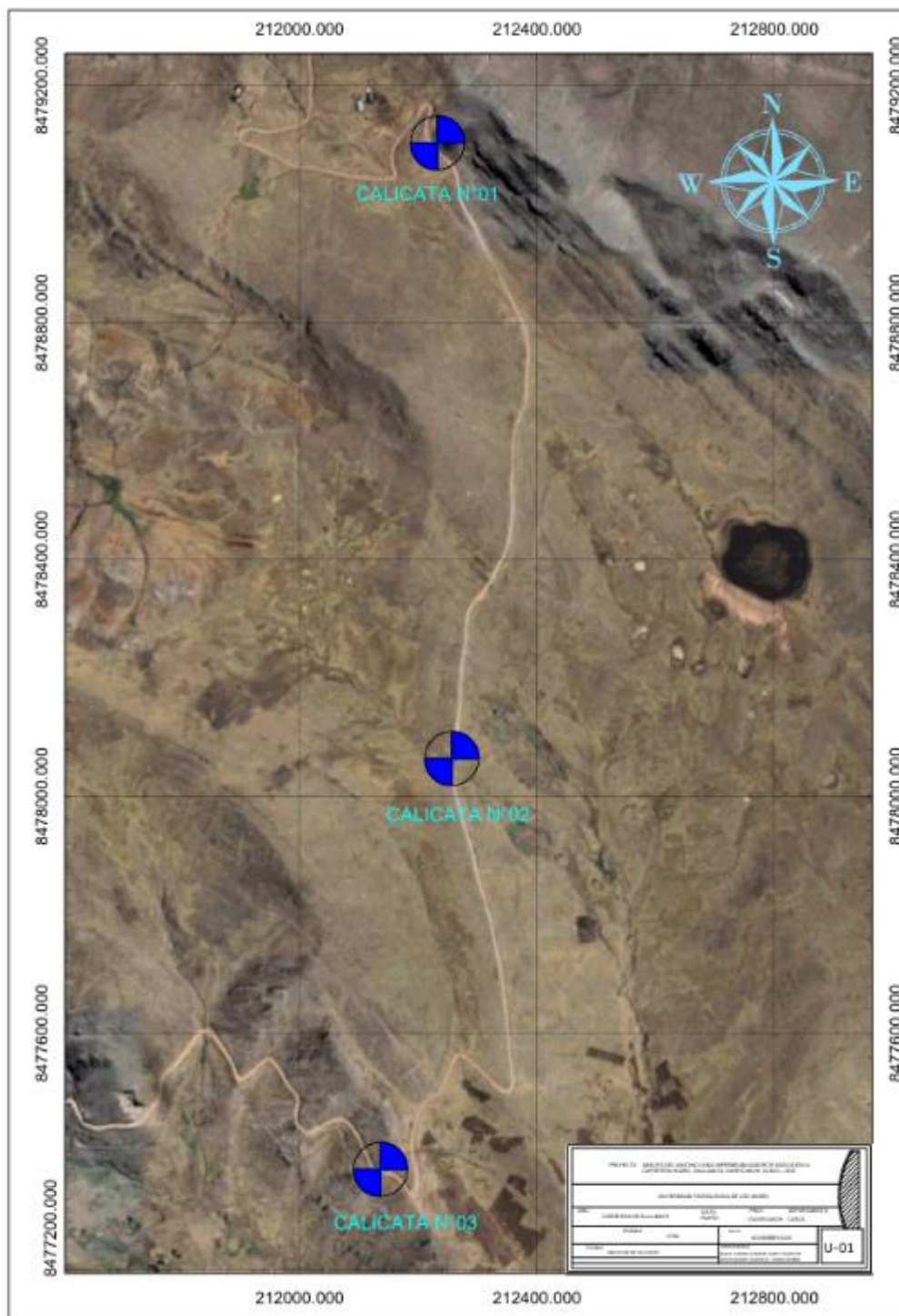
*Puntos de extracción de muestras*



*Nota.* Se muestra los puntos de ubicación con coordenadas.

**Figura 10**

*Plano de Ubicación de Calicatas*



**Tabla 4***Distribución de Ensayos de Laboratorio por Calicata y Concentración de Xantano*

<b>Calicata</b>	<b>Concentración Xantano</b>	<b>Proctor Modificado</b>	<b>CBR</b>	<b>Permeabilidad</b>	<b>Límites de Atterberg</b>	<b>Total por Calicata</b>
<b>C1</b>	0%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
	3%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
	5%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
	7%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
<b>Subtotal C1</b>		<b>20 ensayos</b>	<b>12 ensayos</b>	<b>4 ensayos</b>	<b>4 ensayos</b>	<b>40 ensayos</b>
<b>C2</b>	0%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
	3%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
	5%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
	7%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
<b>Subtotal C2</b>		<b>20 ensayos</b>	<b>12 ensayos</b>	<b>4 ensayos</b>	<b>4 ensayos</b>	<b>40 ensayos</b>
<b>C3</b>	0%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos

<b>Calicata</b>	<b>Concentración Xantano</b>	<b>Proctor Modificado</b>	<b>CBR</b>	<b>Permeabilidad</b>	<b>Límites de Atterberg</b>	<b>Total por Calicata</b>
	3%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
	5%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
	7%	5 puntos	3 niveles	1 ensayo	1 ensayo	10 ensayos
<b>Subtotal C3</b>		<b>20 ensayos</b>	<b>12 ensayos</b>	<b>4 ensayos</b>	<b>4 ensayos</b>	<b>40 ensayos</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>		<b>60 ensayos</b>	<b>36 ensayos</b>	<b>12 ensayos</b>	<b>12 ensayos</b>	<b>120 ensayos</b>

**Nota.** La caracterización completa del material incluyó: (1) Ensayo de Límites de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico); (2) Ensayo de Compactación Proctor Modificado con 5 puntos de humedad (4%, 6%, 8%, 10%, 12%); (3) Ensayo CBR con 3 energías de compactación (55, 26, 12 golpes/capa); (4) Ensayo de Permeabilidad por carga constante. El total general de 120 ensayos garantiza la confiabilidad estadística de los resultados.

## 4.4 Instrumentos

### 4.4.1 Técnicas

#### **Campo:**

Muestreo por juicio en tramos críticos

Extracción de muestras según manual MTC

#### **Laboratorio - Caracterización:**

Granulometría por tamizado (MTC E 107)

Límites de Atterberg (MTC E 110, MTC E 111)

Clasificación SUCS/AASHTO

#### **Laboratorio - Mecánica:**

Compactación Proctor Modificado (MTC E 115)

Ensayo CBR (MTC E 132)

#### **Laboratorio - Hidráulica:**

Permeabilidad por carga constante (MTC E 906)

#### **Análisis:**

ANOVA de dos vías

Pruebas post-hoc Bonferroni

### 4.4.2 Instrumentos

Para el desarrollo de la investigación, se utilizaron instrumentos de laboratorio de Suelos, para procesar los datos de los ensayos. Estos instrumentos, se listan a continuación:

#### **4.4.2.1 Reconocimiento geotécnico (Calicatas)**

- Wincha
- Pico
- Pala
- Barreta

- Saquillos Vacíos
- Pizarra, Marcador acrílico, celular (GPS)

### Figura 11

*Excavación de Calicatas en la Carretera de Sullumayo*



**Nota.** Se muestra la calicata excavada 1.50 m de profundidad para extracción de muestra.

#### 4.4.2.2 *Densidad de Campo*

- Cono de arena (Frasco, válvula y cono): Se utilizó un equipo especializado consistente en un recipiente contenedor de arena, un dispositivo de control de flujo y una guía cónica, conjunto diseñado para la medición volumétrica precisa de excavaciones en el terreno mediante el principio de desplazamiento con material calibrado.
- Plato de metal: Se empleó un disco metálico de base plana con abertura central, que sirvió como plantilla para delimitar el área de ensayo y como superficie de apoyo estable durante el proceso de llenado con arena calibrada.

- Comba: Se hizo uso de un martillo de mano de peso considerable, necesario para la inserción del plato metálico en el terreno y para la realización de la excavación de prueba en materiales compactados.
- Balanza: Se utilizó un instrumento de medición de masa con precisión de gramos, fundamental para determinar el peso de la arena calibrada antes y después de cada ensayo, así como para pesar el material excavado.
- Cíncel: Se empleó una herramienta manual de acero con filo delgado, ideal para el acabado preciso de las paredes de la excavación y la remoción de material en espacios confinados con mínima alteración del suelo circundante.
- Brocha: Se utilizó un instrumento de cerdas suaves para la limpieza exhaustiva de la cavidad excavada, removiendo partículas sueltas y asegurando la integridad volumétrica de la muestra tomada
- Badilejo: Se empleó una pala de mano de dimensiones reducidas para la extracción controlada del material de la excavación, permitiendo la recolección completa y sin pérdidas del suelo removido.
- Ficha de recopilación de datos: Se implementó un formato para el registro de todas las mediciones y observaciones del ensayo, garantizando la trazabilidad y consistencia de la información obtenida en campo
- Arena calibrada: Se utilizó material granular de granulometría controlada y densidad previamente determinada en laboratorio.
- Wincha: Cinta métrica para la medición precisa de dimensiones y profundidades.

**Figura 12**

*Ensayo de Cono de Arena en situ.*



*Nota.* Se muestra el equipo para prueba de densidad de campo.

**4.4.2.3 Contenido de Humedad**

- Balanza: Se empleó un equipo de medición de alta precisión con resolución de 0.01 gramos.
- Horno ( $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ): Se utilizó el horno en temperatura controlada, diseñada para eliminar el agua libre de las muestras mediante exposición prolongada a calor uniforme.
- Tara
- Cucharon metálico
- Muestra
- Recipiente metálico
- Bolsa hermética

**4.4.2.4 Granulometría**

- Tamices:  $\frac{1}{2}$  pulg,  $\frac{3}{8}$  pulg (9.5 mm), N°04 (4,75 mm), N°10 (2,00 mm), N20 (0,6 mm), °N40 (0,426 mm), °N60 (0,250 mm), °N100 (0,149 mm), °N200 (0.075 mm).

- Balanza
- Horno ( $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ )
- Tara
- Brocha
- Escobilla de metal
- Muestra

#### **4.4.2.5 *Sistema de clasificación de los suelos mediante el método SUCS***

- Balanza con precisión de 0.1 g.
- Espátula
- Recipientes de metal para las muestras
- Horno ( $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ )
- Herramienta de acanaladora o ranurador
- Aparato de Casagrande
- Agua
- Base de vidrio
- Muestra

#### **4.4.2.6 *Ensayo de Proctor modificado***

- Molde cilíndrico con un diámetro de 152,4 mm (6 pulg)
- Tamices: Para el ensayo Proctor Modificado, se empleó la fracción de suelo que pasó a través de un tamiz de 3/4" (19 mm), previo tamizado de la muestra total.
- Pistón de metal: Se empleó un compactador metálico con peso y dimensiones especificadas, que aplica energía controlada mediante caída libre sobre el suelo, replicando las condiciones de compactación mediante equipo mecánico en campo.

- Muestra natural
- Goma Xantano
- Balanza
- Horno ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ )
- Bandeja
- Badilejo de metal, cucharon
- Regla metálica de 20 cm
- Agua

#### **4.4.2.7 *Ensayo de CBR (California Bearing Ratio)***

- Molde Cilíndrico.
- Pesas de metal (sobrecargas), y pesas ranuradas de metal.
- Horno ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ).
- Balanzas.
- Pistón de metal.
- Disco circular (usado como espaciador).
- Trípode con deformímetro
- Tanque de agua
- Papel filtro circular
- Prensa de ensayo

#### **4.4.2.8 *Ensayo de carga constante – Permeabilidad***

- Disco poroso
- Permeámetro
- Tubos piezométricos, buretas.
- Manómetro
- Cronometro

## **4.5 Procedimientos**

### **4.5.1 Exploración en Carreteras de bajo volumen**

#### **Equipos y herramientas utilizados**

- Wincha
- Pico
- Pala
- Barreta
- Saquillos Vacíos
- Pizarra y Marcador Acrílico
- Celular con GPS

#### **Procedimiento de ejecución**

El procedimiento de campo se inició con la planificación y georreferenciación del punto de estudio mediante GPS, seleccionando estratégicamente la ubicación de la calicata. Una vez delimitada el área de 1.50 m x 0.80 m x 1.50 m de profundidad con wincha, se procedió a la excavación manual utilizando el pico para romper la capa superficial, la pala para remover el material -que fue depositado en zona segura- y la barreta para fracturar estratos compactos. Durante el proceso, se controló periódicamente la profundidad en las cuatro esquinas, registrando los cambios estratigráficos y verificando que se alcanzara la profundidad reglamentaria de 1.50 m. Tras exponer los diferentes estratos, se realizó una descripción de sus características y se tomaron muestras representativas que fueron inmediatamente colocadas en saquillos debidamente etiquetados con su procedencia.

**Figura 13**

*Trazo de calicatas.*



*Nota.* Se muestra el trazo de calicatas antes de la excavación

**Figura 14**

*Excavación de calicatas.*



**Nota.** Se muestra la profundidad de la calicata según lo estipulado en el manual de carretera (MTC, 2014), en referencia al cuadro 4.1 Numero de Calicatas para exploración de suelos.

De acuerdo con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) del Perú, la exploración del subsuelo es fundamental en el diseño de infraestructura vial. Para carreteras con un Índice Medio Diario Anual (IMDA) menor a 200 vehículos por día, clasificadas como Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito según la Resolución Directoral N° 037-2008-MTC/14, se aplica la (MTC, 2014, p.28)

### Figura 15

Cuadro 4.1 de la MTC, para la exploración de suelos.

**Cuadro 4.1**  
**Número de Calicatas para Exploración de Suelos**

Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de Calicatas	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido</li> </ul>	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido</li> </ul>	
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>4 calicatas x km</li> </ul>	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 calicatas x km</li> </ul>	
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 calicatas x km</li> </ul>	
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA ≤ 200 veh/día, de una calzada.	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 calicata x km</li> </ul>	

**Nota.** Se utilizó como guía el cuadro 4.1 de (MTC, 2014, p. 28), para excavación de calicatas.

Fuente: MTC 2014

#### **4.5.2 Determinación de la Densidad de Campo por el Método del Cono de Arena**

El procedimiento se realiza conforme a lo establecido en (Ministerio de Transportes, 2016, p. 133), MTC E 117. Ensayo medir la densidad y el peso unitario del suelo en su estado natural utilizando el método de cono de arena,

##### **Equipos y herramientas utilizados**

- Cono de arena
- Plato metálico
- Comba
- Balanza
- Cincel y brocha
- Badilejo
- Arena calibrada
- Bolsa hermética
- Wincha
- Ficha de registro

##### **Procedimiento de ejecución**

Para determinar la densidad del suelo in situ en la carretera de Sullumayo, se aplicó el método del cono de arena mediante un proceso cuidadosamente ejecutado en campo. Inicialmente se preparó el equipo calibrado y se colocó el plato metálico sobre una superficie nivelada, fijándolo con golpes controlados. A través de su abertura central, se extrajo el material con ayuda de un badilejo y un cincel, limpiando minuciosamente la cavidad con una brocha para retirar partículas sueltas. Todo el suelo removido se almacenó en bolsas selladas para conservar su humedad natural. Luego, se midió el volumen de la excavación llenándola con arena calibrada desde el cono, anotando las masas de la arena antes y después

del llenado para calcular el volumen desplazado. Como paso final, se pesó el material extraído utilizando una balanza de alta precisión, lo que permitió establecer la densidad del suelo en su estado natural, dato clave para analizar las condiciones de compactación en el tramo de estudio.

### Figura 16

*Se muestra el equipo de Cono de Arena.*



*Nota.* Se realiza la verificación del peso, para la recopilación de datos.

### Figura 17

*Se evidencia el ensayo de cono de arena en Situ*



*Nota.* Se muestra la realización del ensayo de cono de arena.

### 4.5.3 Contenido de Humedad

#### Equipos y herramientas utilizados

- Balanza
- Horno ( $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ )
- Tara
- Cucharon metálico
- Muestra
- Recipiente metálico
- Bolsa hermética

#### Procedimiento de ejecución

La determinación del contenido de humedad de las muestras de suelo de la carretera de Sullumayo se realizó conforme a lo establecido en (Ministerio de Transportes, 2016, p. 49), MTC E 108 y en referencia ASTM 2216.

#### Figura 18

*Pesado de muestra extraída para la densidad de campo.*



*Nota.* Se evidencia la extracción de la muestra en una bolsa hermética.

Utilizando el método de secado en horno a temperatura controlada. El proceso comenzó con la preparación de recipientes metálicos previamente tarados, los cuales fueron pesados individualmente en una balanza con aproximación de 0.1 g.

### Figura 19

*Pesado de muestra antes de entrar al horno.*



**Nota.** Se coloca la muestra en un recipiente para su respectivo pesado antes de ingresar al horno.

Posteriormente, se seleccionaron porciones representativas de las muestras alteradas, considerando el tamaño máximo de partícula presente, y se depositaron en los recipientes, registrando inmediatamente la masa del conjunto suelo húmedo más recipiente. Las muestras así preparadas se introdujeron en el horno mantenido a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , donde permanecieron durante aproximadamente 24 horas hasta alcanzar masa constante, asegurando la completa evaporación del agua contenida en el suelo.

**Figura 20**

*Colocación de muestra en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ .*



**Nota.** Se realizó la colocación en el horno, durante 24 horas aproximadamente.

Transcurrido el tiempo de secado, los recipientes se retiraron del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente antes de realizar la pesada final del conjunto suelo seco más recipiente. El contenido de humedad se calculó mediante la fórmula establecida en la norma, expresando el resultado como porcentaje en relación al peso de las partículas sólidas.

#### 4.5.4 Análisis Granulométrico por Tamizado

##### Equipos y herramientas utilizados

- Tamices: 3/8 pulg (9.5 mm), N°04 (4,75 mm), N°10 (2,00 mm), N20 (0,6 mm), °N40 (0,426 mm), °N60 (0,250 mm), °N100 (0,149 mm), °N200 (0.075 mm).
- Balanza
- Horno ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ )
- Tara
- Brocha
- Escobilla de metal

- Muestra

### Procedimiento de ejecución

Para caracterizar la distribución de tamaños de partícula en las muestras de suelo de la carretera de Sullumayo, se ejecutó un análisis granulométrico basado en los protocolos de la NTP 400.012 y MTC E 107. El proceso comenzó con el secado de la muestra en un horno regulado a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , hasta alcanzar un peso estable que garantizara la eliminación total de humedad. Una vez a temperatura ambiente, se tomó una porción representativa del material, pesándola meticulosamente con una balanza de precisión.

La separación por tamaños se realizó haciendo pasar la muestra por tamices organizados de mayor a menor abertura, desde 3/8 pulg (9.5 mm), N°04 (4,75 mm), N°10 (2,00 mm), N20 (0,6 mm), °N40 (0,426 mm), °N60 (0,250 mm), °N100 (0,149 mm), °N200 (0.075 mm).

### Figura 21

#### *Análisis Granulométrico*



**Nota.** Ordenando los tamices de mayor a menor abertura para determinar la distribución de los tamaños de las partículas del suelo.

**Figura 22**

*Preparando los tamices con la muestra para el análisis granulométrico.*



**Nota.** Colocación de la muestra en el tamiz superior para iniciar el ensayo de granulometría.

Durante un periodo controlado de agitación, las partículas se distribuyeron en los diferentes tamices según su tamaño. Al concluir este proceso, se recolectó el material retenido en cada malla utilizando brocha y escobilla metálica, determinando mediante pesaje individual la proporción de partículas en cada fracción granulométrica.

**Figura 23**

*Resultados del Tamizado*



*Nota.* Resultado del proceso de tamizado: se muestra el material retenido en cada tamiz, ordenado de mayor a menor abertura (de arriba a abajo). La distribución de los pesos retenidos permite construir la curva granulométrica y clasificar el suelo.

#### **4.5.5 Sistema de clasificación de los suelos mediante el método SUCS**

##### **Equipos y herramientas utilizados**

- Balanza con precisión de 0.1 g.
- Espátula
- Recipientes de metal para las muestras
- Horno ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ )
- Herramienta de acanaladora o ranurador
- Aparato de Casagrande
- Agua
- Base de vidrio
- Muestra

##### **Procedimiento de ejecución**

La clasificación de los suelos obtenidos de la carretera de Sullumayo se realizó conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), siguiendo los lineamientos establecidos en el Manual de Ensayo de Materiales del MTC y la Norma Técnica Peruana NTP 339.134. El proceso se desarrolló en varias etapas consecutivas:

Inicialmente, se determinó la distribución granulométrica mediante tamizado, utilizando una balanza con precisión de 0.1 g para cuantificar los porcentajes de gravas, arenas y finos.

Paralelamente, se caracterizaron los límites de consistencia del suelo fino mediante el aparato de Casagrande.

**Figura 24***Preparación del Ensayo de Límites de Atterberg*

**Nota.** Preparación de la muestra del suelo en el recipiente metálico para la determinación de los Límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico).

Para el límite líquido, se colocó una porción de pasta de suelo en la cazuela del aparato, realizando una ranura central con el ranurador y contando el número de golpes necesario para cerrar dicha ranura a lo largo de 13 mm. Variando el contenido de agua se obtuvo la curva de fluidez que define el límite líquido.

**Figura 25***Ejecución de la Ranura Estándar en el Ensayo de Límite Líquido*

**Nota.** Ejecución del ranurado estándar en la muestra de suelo, utilizando la herramienta de dimensiones normalizadas sobre la cápsula de porcelana. Este procedimiento es crucial en

el ensayo de Límite Líquido, ya que define el contenido de humedad correspondiente al límite.

### Figura 26

*Muestra Ranurada para el Ensayo de Límite Líquido.*



**Nota.** Ranura estandarizada finalizada en la muestra de suelo. El ensayo procederá ahora con la aplicación de golpes mediante el aparato de Casagrande para determinar el contenido de humedad correspondiente al Límite Líquido. Fuente: Elaboración propia.

Para el límite plástico, se amasaron rollitos de suelo con diámetro aproximado de 3 mm sobre la base de vidrio, determinando el contenido de humedad al cual estos comenzaban a agrietarse.

### Figura 27

*Recipientes con Muestras para Límite Líquido y Plástico.*



*Nota.* Muestras representativas de los puntos de Límite Líquido y Límite Plástico contenidas en recipientes metálicos, listas para ser pesadas y posteriormente secadas en el horno.

### **Figura 28**

*Proceso de Secado de Muestras de Límites de Atterberg*



*Nota.* Proceso de introducción de las muestras de Límite Líquido y Límite Plástico al horno a una temperatura controlada de  $110 \pm 5$  °C. Este secado se mantendrá por 24 horas o hasta peso constante, para eliminar toda el agua libre y así determinar el contenido de humedad de cada punto del ensayo.

La diferencia entre el límite líquido y plástico proporcionó el índice de plasticidad del material. Con estos parámetros determinados experimentalmente y la curva granulométrica, se procedió a la clasificación según el sistema SUCS mediante el uso de la carta de plasticidad y la tabla de clasificación, identificando así el grupo correspondiente para cada muestra analizada.

#### **4.5.6 Ensayo de Compactación Proctor Modificado**

##### **Equipos y herramientas utilizados**

- Molde cilíndrico con un diámetro de 152,4 mm (6 pulg)

- Tamices
- Pistón de metal
- Muestra natural
- Goma Xantano
- Balanza
- Horno ( $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ )
- Bandeja
- Badilejo de metal, cucharon
- Regla metálica de 20 cm
- Agua

### Procedimiento de ejecución

El estudio de la compactación del suelo de la carretera de Sullumayo se realizó mediante el Ensayo Proctor Modificado, siguiendo el Método C especificado en las normas MTC E 115 y ASTM D 1557, evaluando el efecto del Xantano como aditivo estabilizador. El proceso comenzó con la preparación de la muestra natural, la cual fue secada, disgregada y tamizada por la malla de 19 mm (3/4") para homogenizar el material.

### Figura 29

*Tamizado de las Muestras por el Tamiz 3/4"*



**Nota.** Proceso de tamizado de cada una de las muestras extraídas, utilizando el tamiz de 3/4" (19 mm), de acuerdo con la norma ASTM D 1557. Este paso es fundamental para eliminar partículas gruesas y garantizar la homogeneidad del material, asegurando la repetibilidad y precisión en la determinación de la curva de compactación.

El diseño experimental contempló la preparación de muestras con cuatro dosificaciones diferentes de Xantano: 0%, 3%, 5% y 7% en peso respecto al suelo seco, evaluando cada dosificación con cinco contenidos de humedad diferentes: 4%, 6%, 8%, 10% y 12%.

### **Figura 30**

#### *Preparación Inicial del Ensayo de Compactación*



**Nota.** Vista del área de trabajo con todos los materiales e instrumentos necesarios para ejecutar el ensayo Proctor Modificado.

**Figura 31**

*Dosificación de Goma Xantana para los Ensayos Proctor*



**Nota.** Preparación de las cuatro dosificaciones de goma xantana (0%, 3%, 5% y 7% en peso del suelo seco) que serán utilizadas en los ensayos Proctor Modificado.

Para cada combinación, se calculó la cantidad exacta de Xantano y agua requerida basándose en el peso seco del suelo de 5kg.

**Tabla 5**

*Proporciones de Mezcla para la Dosificación de 0% Xantano*

<b>Contenido de Humedad planteado (%)</b>	<b>Peso de Suelo (g)</b>	<b>Xantano (g)</b>	<b>Agua (ml)</b>
4%	5,000	0	200
6%	5,000	0	300
8%	5,000	0	400
10%	5,000	0	500
12%	5,000	0	600

**Nota.** Resumen de las proporciones de masa utilizadas para la preparación de las muestras en el ensayo Proctor Modificado. Para cada dosificación de goma xantana (0%, 3%, 5% y 7% en peso del suelo seco), se prepararon cinco puntos de contenido de humedad objetivo (4%, 6%, 8%, 10% y 12%).

Los porcentajes de agua (4%, 6%, 8%, 10% y 12%) se eligieron para cubrir un rango amplio que garantice la definición precisa de la curva de compactación del suelo. En estudios previos realizados en suelos de características similares. Por ejemplo, en una investigación reciente con suelo SP-SC (Tello & Caviedes, 2022), el contenido óptimo de humedad varió entre 8.41%, 10.80% y 12.89%. Dado que nuestro suelo es SM (arena limosa), se esperaba un comportamiento similar, por lo que se eligió un rango que abarcara desde condiciones secas (4%) hasta ligeramente por encima del óptimo esperado (12%), para garantizar la correcta definición de la curva de compactación.

La cantidad de agua indicada incluye la corrección por la humedad higroscópica presente en el Xantano, asegurando el contenido de humedad exacto en la mezcla final. El peso del suelo seco se mantuvo constante en 5000 g para todas las mezclas (5kg).

**Tabla 6**

*Proporciones de Mezcla para la Dosificación de 3% Xantano*

<b>Contenido de Humedad Planteado (%)</b>	<b>Peso de Suelo (g)</b>	<b>Xantano (g)</b>	<b>Agua (ml)</b>
4%	5,000	150	206
6%	5,000	150	309
8%	5,000	150	412
10%	5,000	150	515
12%	5,000	150	618

**Nota.** El agua se incrementa para compensar la hidratación del Xantano (150g), manteniendo la humedad objetivo.

**Tabla 7**

*Proporciones de Mezcla para la Dosificación de 5% Xantano*

<b>Contenido de Humedad Planteado (%)</b>	<b>Peso de Suelo (g)</b>	<b>Xantano (g)</b>	<b>Agua (ml)</b>
4%	5,000	250	210
6%	5,000	250	315

8%	5,000	250	420
10%	5,000	250	525
12%	5,000	250	630

**Nota.** Mayor ajuste en el agua debido a la mayor cantidad de Xantano (250g) que requiere hidratación.

### Tabla 8

Proporciones de Mezcla para la Dosificación de 7% Xantano

Contenido de Humedad Planteado (%)	Peso de Suelo (g)	Xantano (g)	Agua (ml)
4%	5,000	350	214
6%	5,000	350	321
8%	5,000	350	428
10%	5,000	350	535
12%	5,000	350	642

**Nota.** Máximo ajuste de agua para la dosificación más alta de Xantano (350g), asegurando la humedad correcta.

La preparación de las muestras consistió en mezclar primero el suelo seco con el Xantano en estado pulverulento hasta lograr distribución homogénea, para luego incorporar el agua calculada mediante aspersión controlada, asegurando mezcla uniforme.

### Figura 32

*Mezcla de Suelo con Goma Xantana*



**Nota.** Proceso de mezcla manual inicial de la goma xantana con el suelo seco antes de la adición de agua. Este paso es crucial para garantizar una distribución homogénea del

biopolímero en toda la masa del suelo, lo que asegurará una reacción uniforme durante la hidratación y una compactación consistente en el ensayo Proctor.

Cada combinación humedad-dosificación se compactó en molde cilíndrico de 152.4 mm aplicando 56 golpes por capa en cinco capas sucesivas, con el pistón metálico estandarizado del equipo Proctor.

### Figura 33

#### *Proceso de Compactación en el Ensayo Proctor Modificado*



**Nota.** Proceso de compactación de una de las cinco capas de la muestra, aplicando exactamente 56 golpes con el martillo Proctor de 4.5 kg (10 lb) y una altura de caída de 457 mm (18 pulgadas), de acuerdo con el procedimiento del Ensayo Proctor Modificado (Método C, ASTM D 1557).

Inmediatamente después de la compactación, se determinó la densidad húmeda y se tomaron muestras para verificar el contenido de humedad real mediante secado en horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ . Este procedimiento se repitió para las tres calicatas, generando un total de 60 curvas de compactación (3 calicatas  $\times$  4 dosificaciones  $\times$  5 contenidos de humedad) que permitieron analizar comparativamente el efecto del Xantano en las propiedades compactación del suelo de estudio.

**Figura 34**

*Control de Calidad Post-Compactación: Pesaje y Muestreo*



**Nota.** Se extrae una muestra representativa del suelo compactado para determinar el contenido de humedad, se pesa humeada, para luego secarla en el horno a 110°C por 24 horas.

#### **4.5.7 Ensayo de CBR (California Bearing Ratio)**

##### **Equipos y herramientas utilizados**

- Molde Cilíndrico.
- Pesas de metal (sobrecargas), y pesas ranuradas de metal.
- Horno (110 ± 5°C).
- Balanzas.
- Pistón de metal.
- Disco circular (usado como espaciador).
- Trípode con deformímetro
- Tanque de agua
- Papel filtro circular

- Prensa de ensayo

### Procedimiento de ejecución

Para evaluar la capacidad de soporte del suelo de la carretera de Sullumayo estabilizado con Xantano, se ejecutó el ensayo CBR de acuerdo con la norma MTC E 132 con referencia en ASTM D 1883. El proceso se diseñó para simular tres niveles distintos de compactación en campo, lo que permite predecir el comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de servicio.

### Figura 35

*Materiales Listos para el Ensayo de Soporte*



*Nota.* Preparación inicial del ensayo CBR mostrando todos los elementos requeridos.

### Figura 36

*Hidratación de la Mezcla Suelo-Xantano*



*Nota.* Incorporación del agua a la mezcla suelo-Xantano para iniciar la hidratación del biopolímero.

Para ello, se prepararon tres especímenes idénticos para cada una de las cuatro dosificaciones de Xantano (0%, 3%, 5% y 7%), aplicando a cada uno una energía de compactación diferente.

### **Preparación de Muestras y Compactación:**

Cada espécimen se compactó en un molde cilíndrico estándar en cinco capas de espesor uniforme. La energía de compactación se controló mediante el número de golpes por capa:

- **Muestra 1:** 55 golpes por capa (simula compactación muy alta, típica en sub-base de pavimentos)

### **Figura 37**

*Compactación Alta (55 golpes/capa)*



**Nota.** Compactación con 55 golpes/capa evaluando dosificaciones de Xantano: 0%, 3%, 5% y 7%.

**Figura 38**

*Compactación Media (26 golpes/capa)*



**Nota.** Compactación con 26 golpes/capa evaluando dosificaciones de Xantano: 0%, 3%, 5% y 7%.

**Figura 39**

*Compactación Baja (12 golpes/capa)*



**Nota.** Compactación con 26 golpes/capa evaluando dosificaciones de Xantano: 0%, 3%, 5% y 7%.

Esta metodología permitió generar curvas de comportamiento para cada dosificación de Xantano bajo diferentes densidades, proporcionando una visión completa de su desempeño.

**Tabla 9***Ensayos CBR - Calicata 1*

<b>Dosificación de Xantano</b>	<b>N° de Golpes por Capa</b>	<b>Número de Muestras</b>
<b>0% (Suelo Natural)</b>	55, 26, 12	3
<b>3%</b>	55, 26, 12	3
<b>5%</b>	55, 26, 12	3
<b>7%</b>	55, 26, 12	3

*Nota.* Ensayos CBR para suelo natural y estabilizado con Xantano (0%, 3%, 5%, 7%) bajo tres energías de compactación (55, 26, 12 golpes/capa). Total: 12 muestras analizadas en Software Excel. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10***Ensayos CBR - Calicata 2*

<b>Dosificación de Xantano</b>	<b>N° de Golpes por Capa</b>	<b>Número de Muestras</b>
<b>0% (Suelo Natural)</b>	55, 26, 12	3
<b>3%</b>	55, 26, 12	3
<b>5%</b>	55, 26, 12	3
<b>7%</b>	55, 26, 12	3

*Nota.* CBR en Calicata 2. Evaluación de Xantano (0%, 3%, 5%, 7%) con compactación a 55, 26 y 12 golpes/capa. Total: 12 muestras analizadas en Software Excel.

**Tabla 11***Ensayos CBR - Calicata 3*

<b>Dosificación de Xantano</b>	<b>N° de Golpes por Capa</b>	<b>Número de Muestras</b>
<b>0% (Suelo Natural)</b>	55, 26, 12	3
<b>3%</b>	55, 26, 12	3

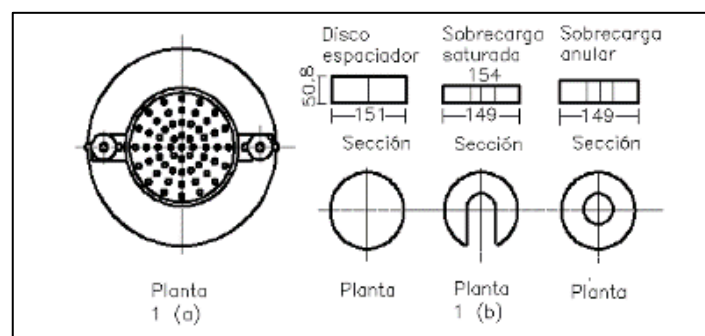
5%	55, 26, 12	3
7%	55, 26, 12	3

**Nota.** CBR para Calicata 3. Análisis de suelo natural y mejorado con Xantano (0%, 3%, 5%, 7%) bajo tres niveles de compactación. Total: 12 muestras analizadas en Software Excel.

Una vez compactadas, las muestras se equiparon con discos espaciadores y pesas ranuradas para simular las sobrecargas del terreno.

#### Figura 40

*Simulación de Sobrecargas de Terreno*



**Nota.** Muestras equipadas con discos espaciadores y pesas ranuradas para simular las condiciones de sobrecarga que experimenta el suelo en campo, según normativa CBR.

Fuente: ASTM D 1883.

El conjunto completo se sumergió en un tanque de agua durante 96 horas, período durante el cual se evaluó la efectividad del Xantano como impermeabilizante al medir la expansión del material.

**Figura 41**

*Ensayo de Expansión e Impermeabilización*



**Nota.** Muestra sumergida durante 96 horas en tanque de agua para medir expansión y evaluar la efectividad del Xantano como impermeabilizante. Control de cambios volumétricos según normativa CBR.

**Figura 42**

*Proceso de Inmersión CBR*



**Nota.** Muestras sumergidas en tanque de agua durante 96 horas. Evaluación del comportamiento hidráulico del suelo con Xantano mediante medición de expansión.

Pasado este tiempo, los especímenes se montaron en la prensa de ensayo para la fase de penetración.

**Figura 43***Ensayo de Penetración CBR*

**Nota.** Prueba de penetración en máquina CBR sobre muestra saturada.

La prueba de penetración se realizó aplicando carga de manera constante a una velocidad controlada de 1.27 mm/minuto. Se registraron las cargas necesarias para alcanzar penetraciones de 0.64 mm (0.025 pulg) y 2.54 mm (0.1 pulg), valores utilizados para calcular el índice CBR según la norma. Los resultados obtenidos para cada dosificación y nivel de compactación permitieron establecer correlaciones entre el contenido de Xantano y la mejora en la capacidad portante del suelo, información fundamental para el diseño del pavimento en la carretera de Sullumayo.

#### 4.5.8 *Ensayo de Permeabilidad por Carga Constante*

##### **Equipos y herramientas utilizados**

- Disco poroso
- Permeámetro
- Tubos piezométricos, buretas.
- Manómetro
- Cronometro

##### **Procedimiento de ejecución**

La evaluación de la permeabilidad del suelo estabilizado con Xantano se realizó mediante el método de carga constante, siguiendo los lineamientos de la norma MTC E 906 y como referencia AASHTO T 215 citado en (Ministerio de Transportes, 2016, p. 949). El objetivo principal fue cuantificar la reducción en la conductividad hidráulica del suelo de la carretera de Sullumayo ante la adición del aditivo impermeabilizante.

El proceso inició con la preparación de especímenes para cada dosificación de Xantano (0%, 3%, 5% y 7%), compactándolos en el permeámetro con la densidad máxima y humedad óptima determinadas en el ensayo Proctor Modificado.

#### Figura 44

##### *Preparación del Permeámetro de Carga Constante*



**Nota.** Ejecución del ensayo de permeabilidad con permeámetro de carga constante.

#### Figura 45

##### *Permeabilidad en Suelo Estabilizado (7% Xantano)*



**Nota.** Medición del coeficiente de permeabilidad bajo carga constante (norma MTC E 906 / AASHTO T 215) en muestra con 7% de Xantano. El ensayo se repitió para todas las

dosificaciones (0%, 3%, 5%, 7%) en cada una de calicatas extraídas de la carretera de Sullumayo para evaluar la reducción de permeabilidad del suelo.

Una vez montado el equipo, se colocó un disco poroso en la base y parte superior del espécimen para garantizar una distribución uniforme del flujo de agua y evitar la migración de partículas finas.

Posteriormente, se saturó el sistema aplicando una carga hidráulica baja de manera gradual durante 24 horas, asegurando la eliminación completa de burbujas de aire que pudieran afectar los resultados. Una vez alcanzada la saturación completa, se estabilizó el nivel de agua en los tubos piezométricos y se inició el ensayo propiamente dicho.

#### Figura 46

##### *Determinación del Coeficiente de Permeabilidad*



**Nota.** Permeámetro de carga constante en funcionamiento midiendo el flujo de agua a través de la muestra de suelo con Xantano. Ensayo realizado bajo norma MTC E 906 (referencia AASHTO T 215) para todas las dosificaciones (0%, 3%, 5%, 7%), con cada una de las calicatas extraídas de la carretera de Sullumayo.

Manteniendo una carga hidráulica constante, se midió el volumen de agua percolada a través del espécimen durante intervalos de tiempo definidos, utilizando buretas graduadas y cronómetro para registrar con precisión los datos.

**Figura 47***Registro Preciso de Agua Percolada*

**Nota.** Medición del volumen de agua permeada mediante buretas graduadas y cronómetro, durante intervalos de tiempo definidos.

Para cada dosificación de Xantano, se registró con precisión el volumen de agua ( $Q$ ) permeado durante intervalos de tiempo ( $t$ ) definidos. Con estos datos se aplicó la Ley de Darcy para calcular el coeficiente de permeabilidad mediante la fórmula:

$$K = \frac{Q \times L}{A \times t \times h}$$

Donde:

- $k$  = Coeficiente de permeabilidad (cm/s)
- $Q$  = Volumen de agua colectado (cm<sup>3</sup>)
- $L$  = Longitud del espécimen (cm)
- $A$  = Área transversal del permeámetro (cm<sup>2</sup>)
- $t$  = Tiempo de medición (s)
- $h$  = Diferencia de carga hidráulica (cm)

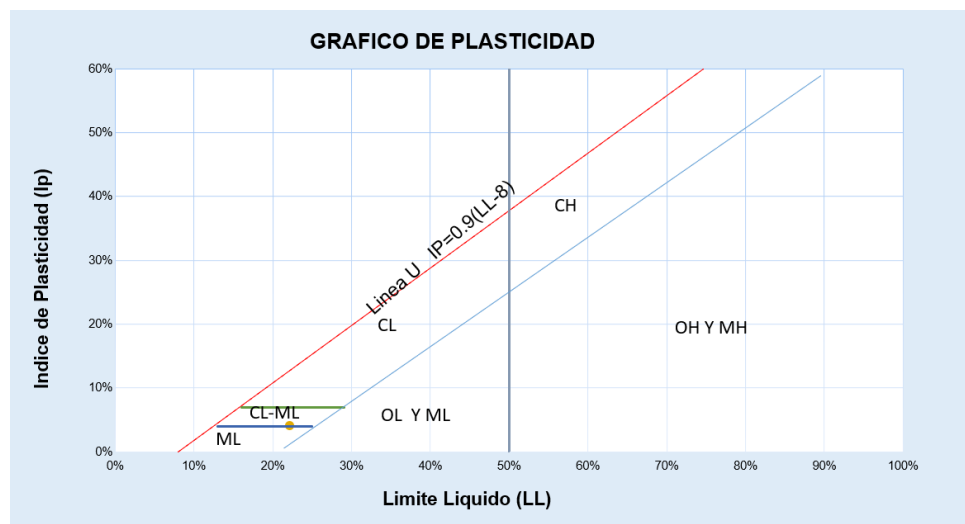
## 4.6 Análisis de datos

### 4.6.1 Análisis del efecto de Xantano en los límites de Atterberg

Antes de aplicar el aditivo, se caracterizaron las tres muestras de suelo (C-01, C-02, C-03) en su estado natural (0% de Xantano). Los resultados revelan un material homogéneo, clasificado como A-2-4 según AASHTO y SC-SM/SM según USCS. Esto indica un suelo limo-arenoso con presencia de grava y algo de arcilla, típico de la zona.

**Figura 48**

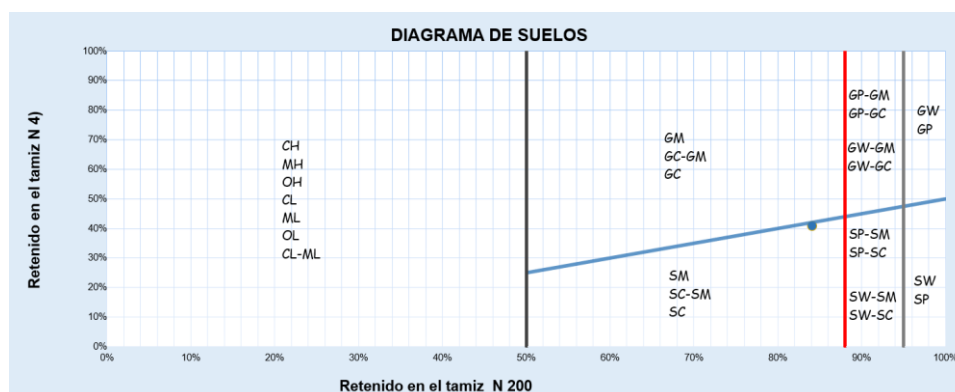
*Gráfico de Plasticidad*



**Nota.** Gráfico de plasticidad que relaciona el Límite Líquido (LL) con el Índice de Plasticidad (IP) para clasificar suelos finos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Figura 49

Carta de Clasificación SUCS para Análisis de Suelos



*Nota.* Diagrama utilizado para clasificar los suelos de estudio según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Tabla 12

Tabla Promedio de Límites de Atterberg en función de la Concentración de Xantano

Concentración de Xantano	Límite Líquido (LL)	Límite Plástico (LP)	Índice Plástico (IP)
0% (Suelo Natural)	0.206	0.171	0.035
3%	0.221	0.171	0.050
5%	0.224	0.167	0.057
7%	0.238	0.170	0.068

*Nota.* Relación entre la concentración de Xantano y los parámetros de consistencia del suelo analizados en el SPSS v28.

**Interpretación:** Se observa un incremento progresivo del Límite Líquido (LL) y el Índice Plástico (IP), mientras el Límite Plástico (LP) se mantiene estable. Esto indica que el Xantano aumenta la plasticidad y capacidad de retención de agua del suelo.

**Tendencias Inmediatas:**

- Límite Líquido (LL): Se observa un aumento constante y progresivo del LL a medida que se incrementa la dosis de Xantano. El suelo con 7% de Xantano requiere significativamente más agua para pasar al estado líquido que el suelo natural.
- Límite Plástico (LP): Los valores del LP se mantienen relativamente estables, con ligeras variaciones que no siguen una tendencia clara.
- Índice Plástico (IP): Existe un incremento marcado y consistente del IP. Este valor es más que duplica (aumenta aproximadamente un 94%) al pasar de 0% a 7% de Xantano.

#### 4.6.2 *Análisis Xantano en la Plasticidad del Suelo (Índice Plástico - IP)*

El biopolímero incrementó el Índice Plástico en un 94.0% con la dosis del 7%, indicando una mayor cohesión y capacidad del suelo para mantener su integridad bajo condiciones variables de humedad.

**Tabla 13**

*Incremento del Índice Plástico por Efecto del Xantano*

Conc. Xantano	IP Promedio	Cálculo Aumento
0%	$(0.0407 + 0.0265 + 0.0378)/3$ <b>= 0.0350</b>	0%
3%	$(0.0561 + 0.0303 + 0.0647)/3$ <b>= 0.0504</b>	$(0.0504 - 0.0350)/0.0350 \times 100$ <b>= 44.0%</b>
5%	$(0.0578 + 0.0415 + 0.0733)/3$ <b>= 0.0575</b>	$(0.0575 - 0.0350)/0.0350 \times 100$ <b>= 64.3%</b>
7%	$(0.0627 + 0.0513 + 0.0897)/3$ <b>= 0.0679</b>	$(0.0679 - 0.0350)/0.0350 \times 100$ <b>= 94.0%</b>

**Nota.** Análisis del aumento porcentual del Índice Plásticidad (IP) en función de la concentración de Xantano, evaluados en porcentaje con analizados en Software Excel.

**Interpretación:** Se observa un incremento progresivo desde 44.0% (3% Xantano) hasta 94.0% (7% Xantano), demostrando la influencia del biopolímero en la plasticidad del suelo. Los valores representan el promedio de tres mediciones por dosificación.

**Tabla 14**

*Concentraciones de Xantano*

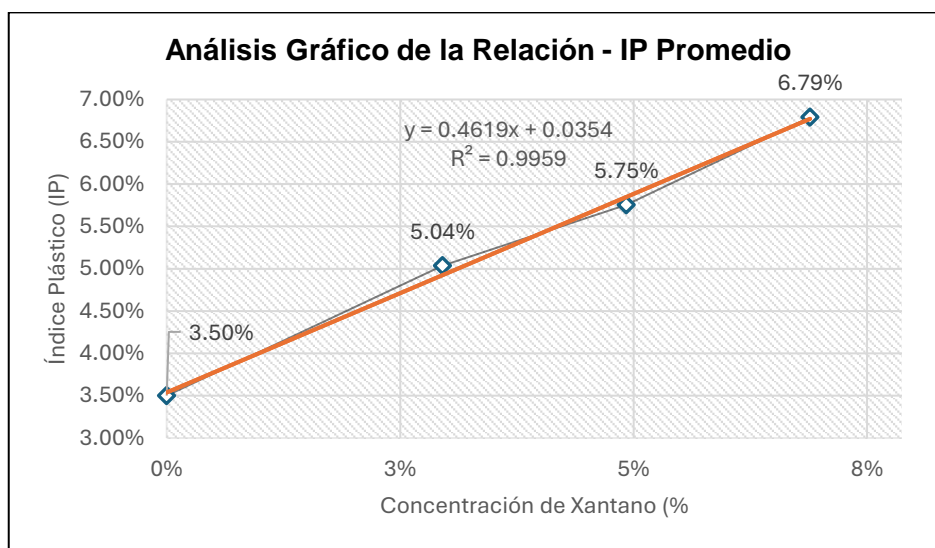
<b>Concentración Xantano</b>	<b>IP Promedio</b>
0%	3.50%
3%	5.04%
5%	5.75%
7%	6.79%

**Nota.** Se observa las diferentes dosificaciones y Promedio de IP, analizados en Software Excel.

**Interpretación:** Incremento significativo del Índice Plásticidad (IP) con mayores concentraciones de Xantano. El suelo natural (0%) presenta un IP de 3.50%, el cual aumenta progresivamente hasta 6.79% con 7% de Xantano, evidenciando una mejora sustancial en la plasticidad y capacidad de cohesión del material.

**Figura 50**

*Relación entre la concentración de Xantano y el Índice Plástico del suelo*



**Nota.** Se observa una correlación positiva fuerte ( $R^2 = 0.9959$ ), donde el IP aumenta linealmente con la dosis del biopolímero, grafico analizado el mediante Software Excel.

**Interpretación:** Esta tendencia confirma el efecto cohesivo del Xantano, que forma una matriz de hidrogel que incrementa la plasticidad del suelo. La ecuación de tendencia  $y = 0.4619x + 0.0354$  permite predecir el comportamiento del IP para dosificaciones intermedias.

#### 4.6.3 Análisis del efecto de Xantano en CBR

El Xantano incrementó la capacidad portante del suelo en un 7.5% con la dosificación óptima del 5%, evidenciando su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas del material. El efecto cementante del biopolímero crea puentes de unión entre partículas, resultando en una subrasante con mayor capacidad de soporte.

**Tabla 15**

*Relación entre la Concentración de Xantano y el CBR Promedio*

Conc. Xantano	CBR Promedio	Cálculo Aumento
0%	$(9.73 + 10.61 + 11.34)/3 = 10.56$	0%

Conc. Xantano	CBR Promedio	Cálculo Aumento
3%	$(10.49 + 11.10 + 11.42)/3$ = <b>11.00</b>	$(11.00 - 10.56)/10.56 \times 100$ = <b>4.2%</b>
5%	$(10.86 + 10.84 + 12.36)/3$ = <b>11.35</b>	$(11.35 - 10.56)/10.56 \times 100$ = <b>7.5%</b>
7%	$(10.67 + 10.45 + 12.17)/3$ = <b>11.10</b>	$(11.10 - 10.56)/10.56 \times 100$ = <b>5.1%</b>

**Nota.** Incremento del valor CBR con la adición de Xantano, analizado mediante Software Excel.

**Interpretación:** La dosificación al 5% muestra el mayor aumento (7.5%), mientras concentraciones mayores (7%) presentan una efectividad ligeramente menor (5.1%). Los valores representan el promedio de tres mediciones por dosificación.

**Tabla 16**

*Efecto del Xantano en la Capacidad de Soporte del Suelo*

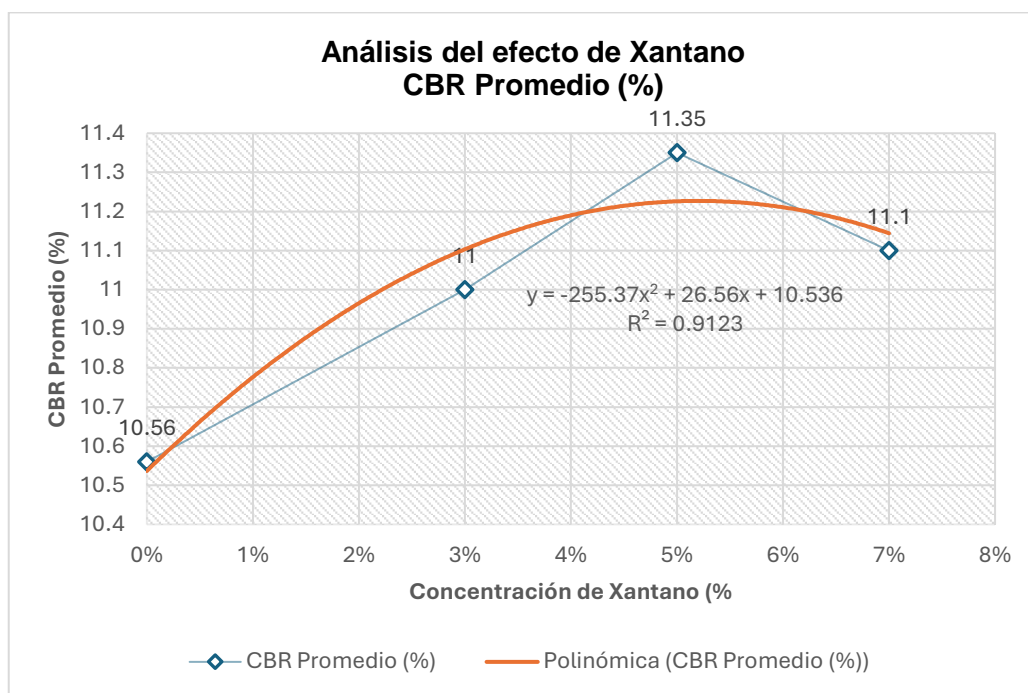
Concentración Xantano	CBR Promedio (%)
0%	10.56
3%	11
5%	11.35
7%	11.1

**Nota.** Variación del valor CBR con diferentes concentraciones de Xantano, analizado mediante Software Excel.

**Interpretación:** Se observa que la dosificación al 5% genera el mayor incremento en la capacidad de soporte (CBR de 11.35%), mientras que concentraciones superiores (7%) muestran una efectividad ligeramente menor (11.1%). El suelo natural (0%) presenta un CBR base de 10.56%.

**Figura 51**

*Relación entre la concentración de Xantano y el valor CBR del suelo*



**Nota.** Se observa la gráfica con un aumento de la capacidad portante hasta un máximo en 5% de Xantano, analizado mediante Software Excel.

#### 4.6.4 *Análisis del efecto de Xantano en Permeabilidad*

La adición del biopolímero Xantano demostró ser efectiva en la reducción de la permeabilidad del suelo, alcanzando una disminución del 85.1% con la dosificación del 7%. Esta reducción progresiva (63.8% al 3% y 68.4% al 5%) se atribuye a la formación de una matriz de hidrogel que obstruye los espacios porosos.

**Tabla 17**

*Reducción de la Permeabilidad por Adición de Xantano*

Conc. Xantano	Permeabilidad (cm/s)	Cálculo Reducción
0%	$(0.00264 + 0.00354 + 0.00369)/3 = \mathbf{0.00329}$	0%
3%	$(0.00178 + 0.000797 + 0.00101)/3 = \mathbf{0.00119}$	$(0.00329 - 0.00119)/0.00329 \times 100 = \mathbf{63.8\%}$

5%	$(0.00156 + 0.000655 + (0.00329 - 0.00104)/0.00329 \times 100$ $0.000904)/3 = \mathbf{0.00104}$	$= \mathbf{68.4\%}$
7%	$(0.000733 + 0.000249 + (0.00329 - 0.00049)/0.00329 \times 100$ $0.000484)/3 = \mathbf{0.00049}$	$= \mathbf{85.1\%}$

**Nota.** La permeabilidad disminuye significativamente con el aumento de la concentración de Xantano, analizado mediante Software Excel.

**Interpretación:** La dosificación al 7% muestra la mayor reducción (85.1%), disminuyendo la permeabilidad de 0.00329 cm/s (suelo natural) a 0.00049 cm/s. Los valores representan el promedio de tres mediciones.

**Tabla 18**

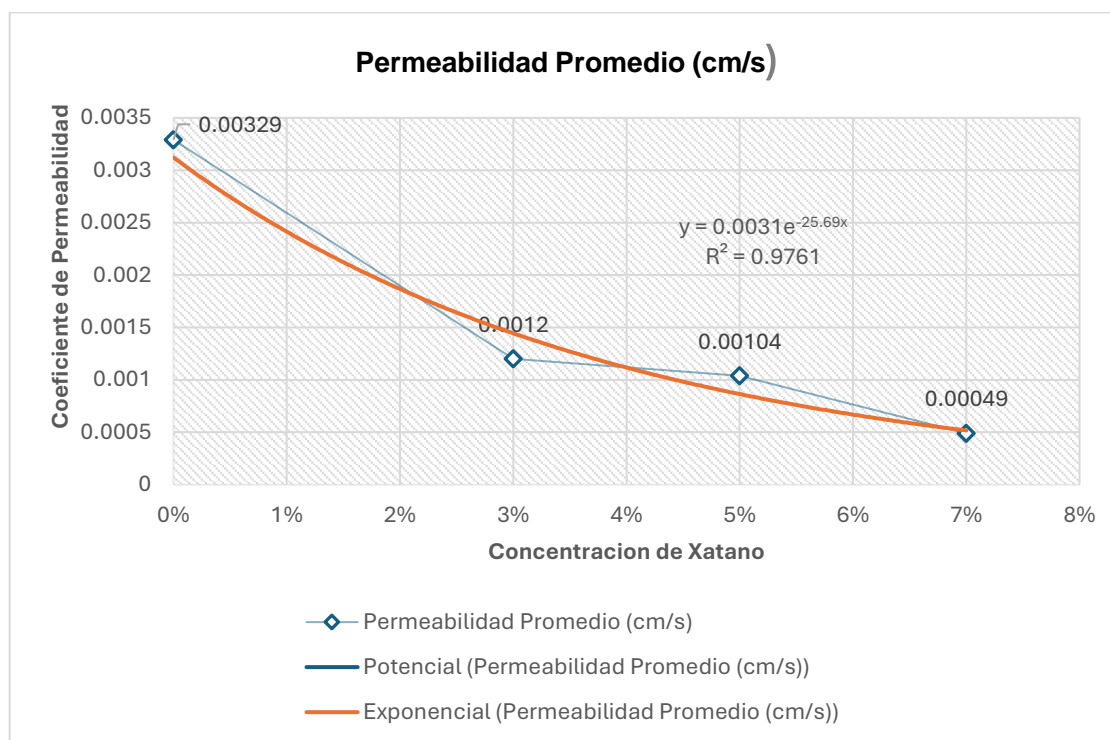
*Reducción de la Permeabilidad con Diferentes Concentraciones de Xantano*

<b>Concentración Xantano</b>	<b>Permeabilidad Promedio (cm/s)</b>
0%	0.00329
3%	0.00120
5%	0.00104
7%	0.00049

**Nota.** Relación inversa entre la concentración de Xantano y la permeabilidad del suelo, resultados obtenidos de laboratorio.

**Figura 52**

*Relación entre la concentración de Xantano y el coeficiente de permeabilidad del suelo*



**Nota.** Se observa una reducción exponencial de la permeabilidad con el aumento del biopolímero ( $R^2 = 0.9761$ ).

**Interpretaron:** La ecuación de tendencia  $y = 0.0031e^{-25.69x}$  indica que el Xantano reduce la permeabilidad de manera drástica, demostrando su alta efectividad como impermeabilizante.

#### 4.6.5 Análisis de Viabilidad Económica por Dosificación de Xantano

El análisis se centra en el costo directo de implementación del biopolímero Xantano para un tramo representativo de 1 km de carretera. Se considera:

**Tabla 19**

*Parámetros base para el análisis económico*

Parámetro	Cantidad	Unidad	Descripción
-----------	----------	--------	-------------

Longitud del tramo	1.0	km	Tramo crítico identificado
Ancho de calzada	3.8	m	Ancho típico de trocha carrozable
Espesor de tratamiento	0.20	m	Espesor de capa de subrasante
Volumen total a tratar	760	m <sup>3</sup>	Cálculo: 1000 m × 3.8 m × 0.20 m
Peso unitario del suelo (γ)	1,998	kg/m <sup>3</sup>	Valor promedio
Peso total de suelo	1,518,480	kg	Cálculo: 760 m <sup>3</sup> × 1,998 kg/m <sup>3</sup>
Precio del Xantano	46.00	S/ kg	Investigación de mercado

**Nota.** Datos tomado con la finalidad de obtener la viabilidad económica.

### Costo del Insumo (Xantano)

El costo del biopolímero se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Costo Xantano} = \text{Peso total suelo} \times \left( \frac{\% \text{ Dosificación}}{100} \right) \times \text{Precio unitario}$$

**Tabla 20**

*Costo del insumo Xantano por dosificación*

Dosificación (%)	Cálculo del peso de Xantano	Peso de Xantano (kg)	Cálculo del costo	Costo Total del Xantano (S/)
<b>0% (Testigo)</b>	1,518,480 × 0%	0	0 × S/ 46	<b>0</b>
<b>3%</b>	1,518,480 × 0.03	<b>45,554.4</b>	45,554.4 × 46	<b>2,095,502.40</b>
<b>5%</b>	1,518,480 × 0.05	<b>75,924.0</b>	75,924.0 × 46	<b>3,492,504.00</b>
<b>7%</b>	1,518,480 × 0.07	<b>106,293.6</b>	106,293.6 × 46	<b>4,889,505.60</b>

**Nota.** El costo del insumo presenta un crecimiento lineal con la dosis, siendo el salto de 0% a 7% el de mayor impacto económico absoluto.

#### **4.7 Consideraciones éticas**

Durante el desarrollo de la investigación, se adoptaron principios éticos fundamentales que garantizaron la integridad científica, el respeto a la comunidad y la transparencia metodológica. Estas consideraciones se articularon en los siguientes aspectos:

##### **Respeto a la comunidad y al entorno:**

Se obtuvo la autorización expresa del presidente de la Comunidad Campesina de Sullumayo y de los comuneros presentes para realizar las excavaciones de las calicatas. Se respetaron las decisiones de la comunidad en cuanto al número y ubicación de las mismas, limitando la intervención a tres puntos de muestreo para minimizar el impacto en sus terrenos.

##### **Rigor científico e integridad académica:**

Se aseguró la originalidad del trabajo mediante la citación correcta de fuentes y la elaboración propia de los datos experimentales. Los ensayos se realizaron conforme a normas técnicas nacionales e internacionales (MTC, ASTM), asegurando la validez y reproducibilidad de los resultados.

##### **Compromiso social y sostenibilidad:**

La investigación se orientó a proponer una solución técnica sostenible y ambientalmente amigable, buscando contribuir al desarrollo local y a la mejora de la infraestructura vial de la comunidad de Sullumayo.

## V. Resultados y discusión

### 5.1 Resultados

#### 5.1.1 Efecto del Xantano en el Índice de Plasticidad

El análisis de varianza de dos vías reveló que la concentración de Xantano ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre el Índice de Plasticidad de los suelos ( $F = 10.049$ ,  $p = 0.009$ ). Asimismo, se encontraron diferencias significativas entre las calicatas estudiadas ( $F = 14.860$ ,  $p = 0.005$ ), indicando variabilidad natural en las propiedades de los suelos de la carretera de Sullumayo.

**Tabla 21**

*Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías para el Índice de Plasticidad*

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Conc_Xantano	,002	3	,001	10,049	,009
Calicata	,002	2	,001	14,860	,005

**Nota.** Los valores de  $p < 0.05$  confirman que los resultados no son aleatorios, sino significativos, los factores analizados (concentración de xantano y ubicación de la calicata) afectan significativamente el IP. proporcionando una base estadística sólida para recomendar el uso de Xantano como estabilizador de la subrasante.

**Tabla 22**

*Diferencia significativa respecto al control (Bonferroni)*

Concentración de Xantano	Calicata 1 (SC-SM)	Calicata 2 (SM)	Calicata 3 (SM)	Promedio	% Cambio vs Control
0% (Control)	4.07%	2.65%	3.78%	3.50%	-
3%	5.61%	3.03%	6.47%	5.04%	↑ 44%
5%	5.78%	4.15%	7.33%	5.75%	↑ 64%

7%	6.27%	5.13%	8.97%	6.79%	↑ 94%
----	-------	-------	-------	-------	-------

**Nota.** Los resultados del test post-hoc de Bonferroni confirman que todas las concentraciones de Xantano (0%, 3%, 5% y 7%) producen un aumento estadísticamente significativo. Este salto transforma el comportamiento del suelo de baja plasticidad (SM) a plasticidad moderada.

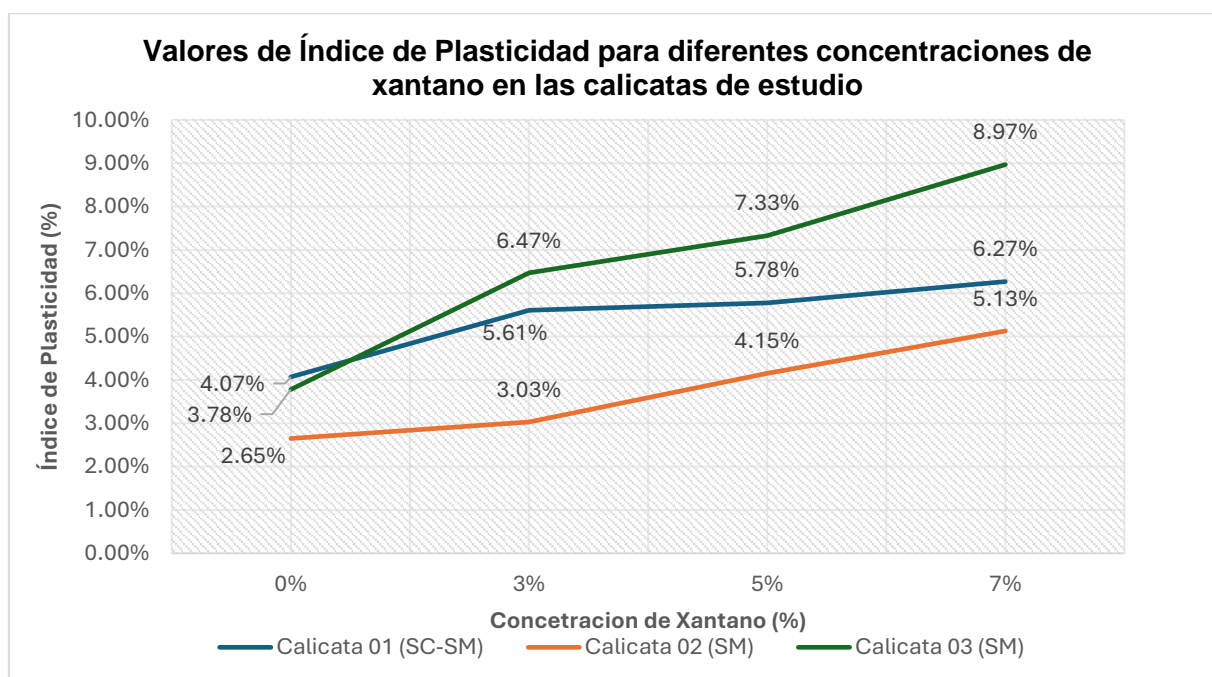
**Interpretación:** Al tener un IP con un aumento del 94%, se tiene una mejor capacidad para mantener la integridad estructural bajo condiciones variables de humedad y también una mayor resistencia a la erosión por escorrentía superficial.

### Tendencia Grafica observada

El Índice de Plasticidad mostró un incremento dependiente de la concentración de Xantano, pasando de 3.50% en el control (0% Xantano) a 6.79% con la concentración máxima de 7%, representando un aumento del 94%. Las pruebas post hoc de Bonferroni confirmaron que esta diferencia es estadísticamente significativa ( $p = 0.011$ ).

### Figura 53

*Tendencia creciente del Índice de Plasticidad.*



**Nota.** Se muestra el aumento significativo del Índice de Plasticidad sugiere que el Xantano modifica la estructura del suelo.

**Interpretación:** El mecanismo del Xantano, es clave para explicar los cambios observados. Debido al pH básico del suelo ( $\approx 9.8$ ), el Xantano se hidrata y sus grupos de carboxilo se ionizan ( $-\text{COO}^-$ ), formando un gel viscoso que se expande. Este gel actúa de tres formas: cubre las partículas del suelo, ocupa los espacios entre ellas y las une formando puentes de hidrogeno. La eficacia de este mecanismo queda demostrada en el aumento del Índice de Plasticidad (IP), teniendo un suelo (SM) inicialmente con un IP de 3.78%, el cual mostraba un comportamiento de baja plasticidad, poca cohesión y alta susceptibilidad a la erosión. Tras la estabilización con un 7% de Xantano, el IP se incrementó a 8.97%, indicando un comportamiento de plasticidad moderada, una mayor cohesión y consecuentemente una mejor resistencia a la erosión, esto contradice nuestra **H.E.2.** (La resistencia al corte de suelo disminuye de manera significativa con el aumento de la concentración de Xantano). Estos resultados verifican que el Xantano modifica significativamente las propiedades cohesivas del suelo al demostrar un aumento del 94% en el Índice de Plasticidad con 7% de Xantano, lo que indica un incremento en la cohesión y no una disminución de la resistencia al corte como se había planteado inicialmente.

### 5.1.2 Efecto del Xantano en MDS

El análisis de varianza de dos vías no mostró efectos estadísticamente significativos de la concentración de Xantano ( $F(3,6) = 0.750$ ,  $p = 0.561$ ) ni de la calicata ( $F(2,6) = 0.583$ ,  $p = 0.587$ ) sobre la densidad máxima seca. Sin embargo, las medias marginales estimadas revelaron un patrón consistente.

**Tabla 23**

*Análisis de varianza de dos vías para densidad máxima seca*

Origen	Tipo III de	gl	Media	F	Sig.
--------	-------------	----	-------	---	------

	suma de cuadrados		cuadrática		
Conc_Xantano	,001	3	,000	,750	,561
Calicata	,000	2	,000	,583	,587

**Nota.** La ausencia de significancia resalta que el suelo tratado puede alcanzar densidades equivalentes a las del suelo natural, confirmando que la reducción de permeabilidad no compromete la resistencia al corte en la subrasante.

**Tabla 24**

*Densidad Máxima Seca por Concentración de Xantano.*

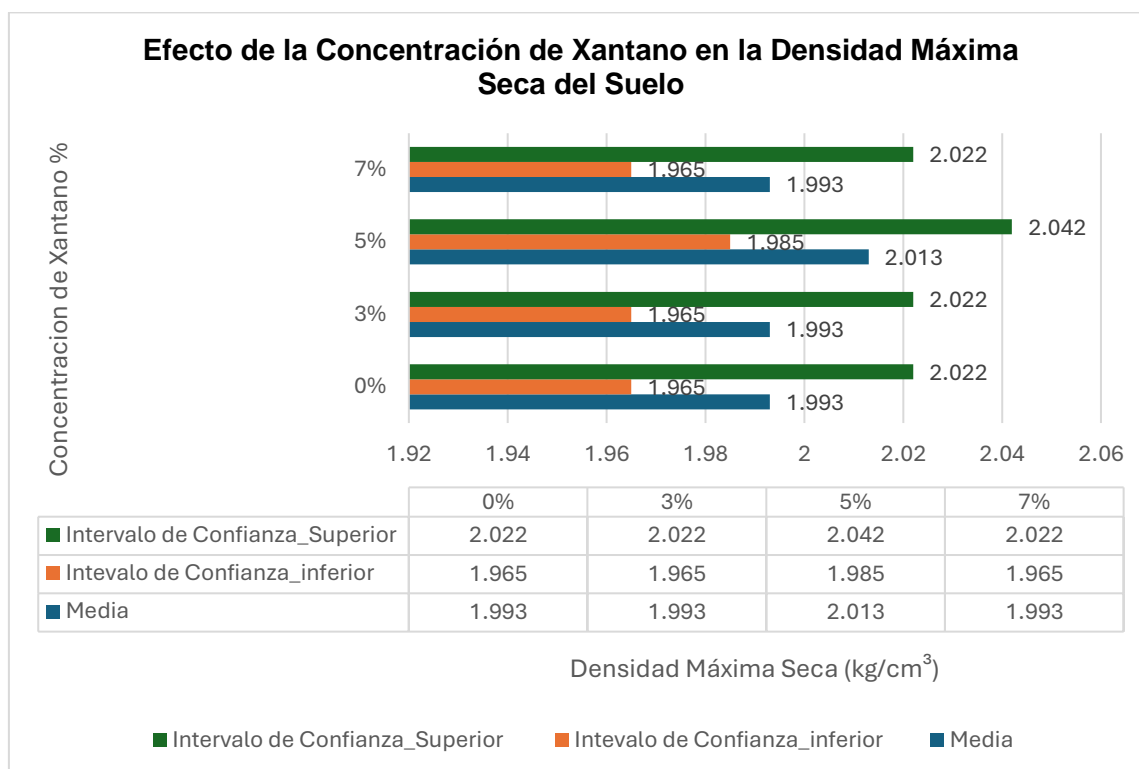
Conc. Xantano	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
0%	1,993	,012	1,965	2,022
3%	1,993	,012	1,965	2,022
5%	2,013	,012	1,985	2,042
7%	1,993	,012	1,965	2,022

**Nota.** Los valores de Densidad Máxima Seca (MDS) se mantienen consistentes en todas las concentraciones de Xantano, cambiando entre 1.993 g/cm<sup>3</sup> y 2.013 g/cm<sup>3</sup>.

**Interpretación:** Para la aplicación esto confirma que el Xantano no perjudica la compactación de la subrasante, permitiendo alcanzar densidades equivalentes o incluso ligeramente superiores a las del suelo natural, sin comprometer su resistencia.

**Figura 54**

*Efecto de la Concentración de Xantano en la Densidad Máxima Seca del Suelo*



**Nota.** La gráfica muestra la densidad máxima seca y sus intervalos de confianza.

**Interpretación:** El suelo (SM) de la carretera de Sullumayo presenta un pH básico ( $\approx 9.8$ ). Al entrar en contacto con en el agua y el Xantano, este polímero se hidrata y sus grupos carboxilo se ionizan ( $-\text{COO}^-$ ), generando un gel viscoso y expansivo. Este gel actúa recubriendo las partículas del suelo, sellando sus poros y estableciendo puentes entre ellas, sin alterar la Densidad Máxima Seca (MDS), demostrando que su uso como impermeabilizante no compromete la capacidad de compactación de la subrasante, rechazando **H.E.2**. (La resistencia al corte de suelo disminuye de manera significativa con el aumento de la concentración de Xantano). Al mantener ligeramente la MDS, la resistencia al corte no se ve comprometida. Por lo tanto, el proceso mantendrá los mismos estándares de compactación y control de calidad establecidos.

### 5.1.3 Efecto de Xantano en Contenido de Humedad Óptimo

El análisis de varianza reveló efectos altamente significativos tanto de la concentración de Xantano ( $F(3,6) = 11.124$ ,  $p = 0.007$ ) como de la calicata ( $F(2,6) = 6.217$ ,  $p = 0.034$ ) sobre el contenido de humedad óptimo. El modelo explicó el 88.4% de la variabilidad total ( $R^2 = 0.884$ ), indicando una excelente capacidad predictiva.

**Tabla 25**

*ANOVA del contenido de humedad óptimo.*

<b>Fuente</b>	<b>F</b>	<b>Sig</b>	<b><math>\eta^2</math> parcial</b>
Xantano	11.124	0.007	0.848
Calicata	6.217	0.034	0.675

**Nota.** El análisis de varianza confirma que tanto la concentración de Xantano ( $\text{Sig} = 0.007$ ) como la ubicación de la calicata ( $\text{Sig} = 0.034$ ) tienen efectos altamente significativos sobre el contenido de humedad óptimo (CHO).

**Interpretación:** La dosificación de Xantano será el principal determinante del agua requerida para alcanzar la compactación máxima de la subrasante.

**Tabla 26**

*Contenido de humedad óptimo por concentración.*

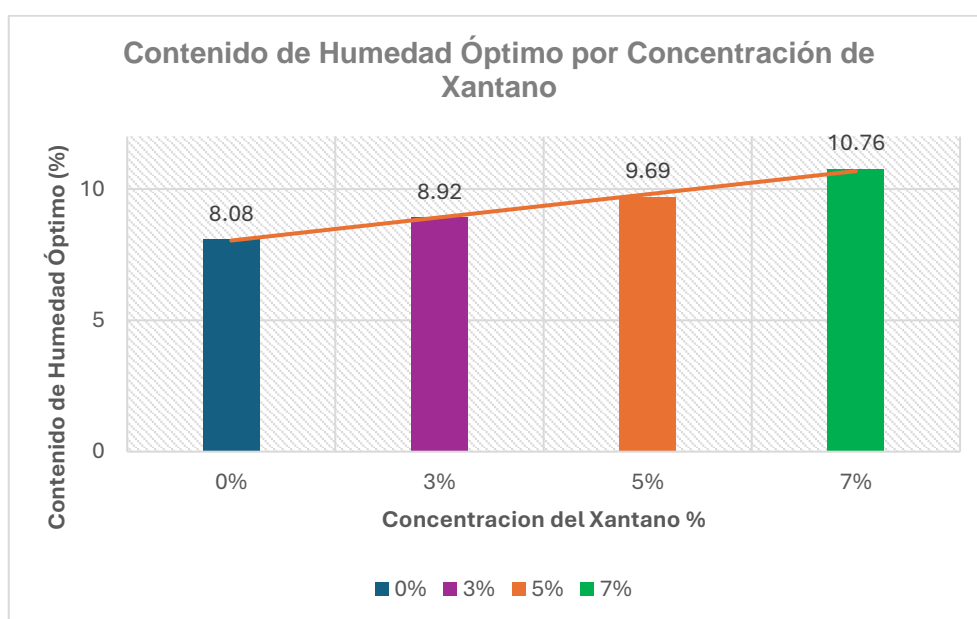
<b>Concentración</b>	<b>Media (%)</b>	<b>Dif. vs Control</b>
0%	8.08	-
3%	8.92	+0.84
5%	9.69	+1.61
<b>7%</b>	<b>10.76</b>	<b>+2.68*</b>

**Nota.** El contenido de humedad óptimo aumenta progresivamente con la concentración de Xantano, siendo significativamente mayor (10.76%) con la dosis del 7% en comparación al suelo natural (8.08%).

**Interpretación:** El incremento presenciado es consecuencia directa de las propiedades hidrofílicas del Xantano, que retiene más agua en la matriz del suelo. Quiere decir que el suelo requiere más agua durante la compactación para alcanzar su máxima densidad seca (MDS), esto exige un control estricto de la humedad durante la compactación.

**Figura 55**

*Variación del contenido de humedad óptimo con la concentración de Xantano*



**Nota.** El gráfico muestra la de dosificación de concentración de Xatano y Contenido de Humedad Optima.

**Interpretación:** Para lograr una adecuada compactación al incrementar la concentración de Xantano, es necesario ajustar también el contenido de humedad optimo de agua, ya que en el pH básico del suelo ( $\approx 9.8$ ) este biopolímero se hidrata y sus grupos de carboxilo se ionizan ( $-\text{COO}^-$ ), generando un gel viscoso y expansivo que recubre las

partículas, rellena los poros y forma puentes de unión. Si solo se añade Xantano y se compacta con la humedad natural del suelo 8.08%, el gel no se desarrolla completamente, lo que impide alcanzar la densidad máxima y resulta en una subrasante mal compactada. Esto contradice la **H.E.2.** (La resistencia al corte de suelo disminuye de manera significativa con el aumento de la concentración de Xantano). Los parámetros evaluados muestran un aumento notable en el Índice de Plasticidad, se mantiene la densidad máxima seca, significando una mayor cohesión = mayor unión entre partículas de terreno, por lo que no disminuye la resistencia en el suelo.

#### **5.1.4 Efecto del Xantano en el CBR**

Se realizó un análisis de varianza de dos vías utilizando el software IBM SPSS versión 28. Este modelo permitió evaluar los efectos principales de dos factores: la concentración de Xantano (0%, 3%, 5%, 7%) y el tipo de calicata (C1, C2, C3), así como su efecto sobre la variable dependiente CBR.

El diseño estadístico implementado fue un modelo lineal general con los siguientes componentes:

- Variable dependiente: Valores de CBR
- Factores fijos: Concentración de Xantano (4 niveles) y Calicata (3 niveles)
- Método de suma de cuadrados: Tipo III
- Nivel de significancia:  $\alpha = 0.05$

Para el análisis post-hoc de diferencias entre grupos, se utilizó la prueba de Bonferroni, que controla el error tipo I en comparaciones múltiples. Adicionalmente, se calcularon las medias marginales estimadas y los tamaños del efecto mediante eta cuadrado parcial ( $\eta^2$ ).

**Tabla 27**

*Presenta los estadísticos descriptivos del CBR para cada combinación de los factores estudiados.*

<b>Estadísticos descriptivos</b>				
Conc. Xantano	Calicata	Media	Desv. Desviación	N
0%	C1	9,7300	.	1
	C2	10,6100	.	1
	C3	11,3400	.	1
	Total	10,5600	,80616	3
3%	C1	10,4900	.	1
	C2	11,1000	.	1
	C3	11,4200	.	1
	Total	11,0033	,47248	3
5%	C1	10,8600	.	1
	C2	10,8400	.	1
	C3	12,3600	.	1
	Total	11,3533	,87186	3
7%	C1	10,6700	.	1
	C2	10,4500	.	1
	C3	12,1700	.	1
	Total	11,0967	,93602	3
Total	C1	10,4375	,49527	4
	C2	10,7500	,28296	4
	C3	11,8225	,51784	4
	Total	11,0033	,73868	12

*Nota.* Se muestra los estadísticos descriptivos por nivel de factores y para sus combinaciones. Para cada combinación específica de concentración de Xantano y Calicata.

### **Prueba de Homogeneidad de Varianzas**

**Tabla 28**

*Análisis de varianza de dos vías para el CBR*

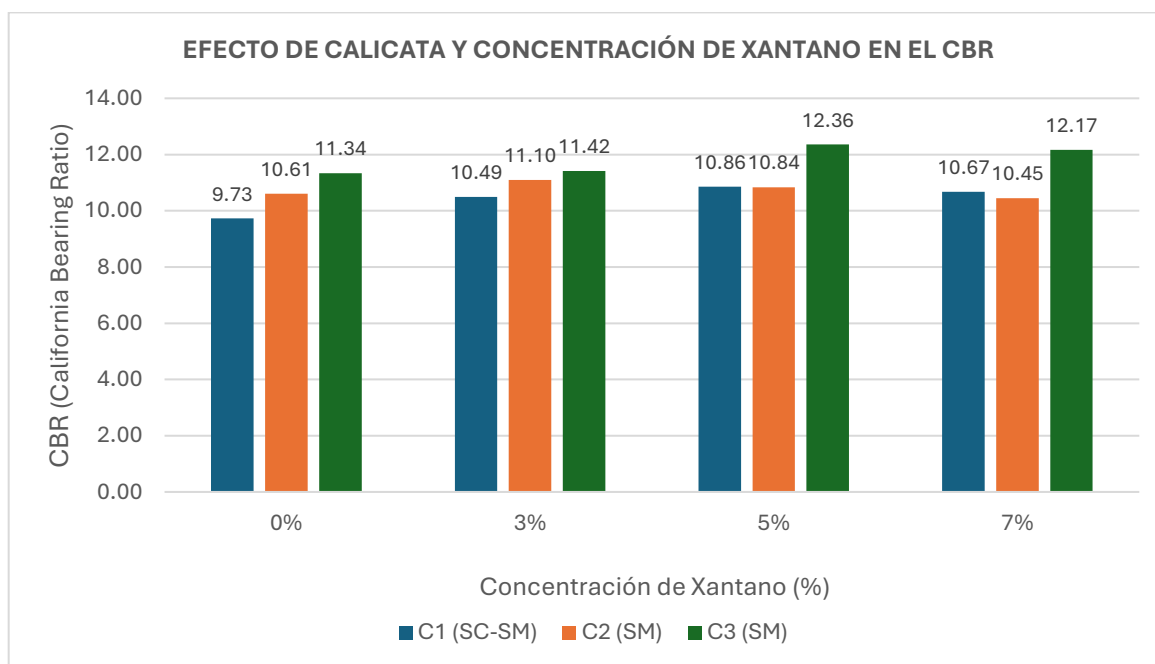
<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>
---

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Media cuadrática	F	Sig.	$\eta^2$ parcial
Conc_Xantano	,983	,328	2,467	0,160	0,552
Calicata	4,222	2,111	15,885	0,004	0,841

**Nota.** La concentración de Xantano no muestra un efecto estadísticamente significativo ( $p=0.160$ ) sobre el CBR, aunque su tamaño de efecto es medio ( $\eta^2=0.552$ ). Esto indica que el Xantano no perjudica la capacidad de portante del suelo.

### Figura 56

Presenta los resultados del CBR para las diferentes combinaciones experimentales evaluadas.



**Nota.** La calicata C3 presenta los valores de CBR más altos con la concentración de Xantano.

**Interpretación:** Al tener el pH básico del suelo ( $\approx 9.8$ ), el Xantano se hidrata y sus grupos de carboxilo se ionizan ( $-\text{COO}^-$ ), generando un gel viscoso y expansivo que, al recubrir las partículas y formar puentes entre ellas, aumenta directamente la cohesión interna

del suelo. Este refuerzo químico se traduce en una mayor capacidad indicando que el Xantano no deteriora la capacidad portante (CBR) ni la funcionalidad estructural de la subrasante. Un suelo con CBR de 9.73% se clasifica como S<sub>2</sub> (Regular) donde resistirá los esfuerzos cortantes, compresión, tensión y las variaciones de humedad típicas. Por el contrario, al superar el 10% de CBR al 12.36%, se alcanza la clasificación S<sub>3</sub> (Buena). Esto lo hace apto para su uso en subrasantes de caminos rurales, capaces de soportar los esfuerzos combinados generados por el tráfico y el entorno. Por lo que rechazamos la **H.E.2.** (La resistencia al corte de suelo disminuye de manera significativa con el aumento de la concentración de Xantano), ya que no se observa disminución de la resistencia, y respecto a **H.E.4** (La concentración óptima de Xantano maximiza la resistencia al corte del suelo en 20% con respecto al suelo natural) no se verifica, el aumento máximo del CBR fue del 7.5%, no del 20% según lo esperado. En consecuencia, el Xantano es una alternativa viable ya que reduce la permeabilidad de la subrasante sin sacrificar su capacidad portante.

### Figura 57

*Categorías de Sub rasante.*

CATEGORÍAS DE SUB RASANTE	CBR
S <sub>0</sub> : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S <sub>1</sub> : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S <sub>2</sub> : Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S <sub>3</sub> : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S <sub>4</sub> : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S <sub>5</sub> : Sub rasante excelente	CBR ≥ 30%

**Nota.** Se muestra Cuadro 4.11 Categorías de Sub rasante en función al CBR. Fuente: (MTC, 2014, p. 37)

#### 5.1.5 Efecto del Xantano como Impermeabilizador

El análisis estadístico reveló que la concentración de Xantano tiene un efecto altamente significativo sobre la permeabilidad del suelo ( $F = 18.606$ ,  $Sig = 0.002$ ), explicando el 90.3% de la variabilidad observada ( $\eta^2 = 0.903$ ). Por el contrario, el mismo

factor no mostró un efecto significativo sobre el gradiente hidráulico aplicado durante los ensayos ( $F = 2.401$ ,  $Sig = 0.166$ ). Esta dosificación confirma que las reducciones en permeabilidad observadas son atribuibles específicamente a modificaciones en las propiedades del suelo por efecto del Xantano, y no a variaciones en las condiciones experimentales.

**Tabla 29**

*Análisis de varianza de dos vías para permeabilidad*

<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>						
<b>Origen</b>	<b>Tipo III de suma de cuadrados</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>	<b><math>\eta^2</math> parcial</b>	
Conc_Xantano	1,359E-5	4,531E-6	18,606	,002	0.903	
Calicata	2,729E-7	1,365E-7	,560	,598	0.157	

**Nota.** El efecto de la concentración de Xantano sobre la permeabilidad es altamente significativo ( $p=0.002$ ), confirmando que el Xantano es un factor determinante en la reducción de la permeabilidad, lo que indica que es consistente y aplicable en subrasante.

**Tabla 30**

*Estadísticos Descriptivos de Permeabilidad por Concentración de Xantano y Calicata*

<b>Estadísticos descriptivos</b>				
Variable dependiente: Permeabilidad (cm/s)				
Conc. Xantano	Calicata	Media (cm/s)	Desv. Desviación	N
0%	C1	,00264000	.	1
	C2	,00354000	.	1
	C3	,00369000	.	1
	Total	,00329000	,000567891	3
3%	C1	,00178000	.	1
	C2	,00079700	.	1
	C3	,00101000	.	1
	Total	,00119567	,000517133	3

5%	C1	,00156000	.	1
	C2	,00065500	.	1
	C3	,00090400	.	1
	Total	,00103967	,000467504	3
7%	C1	,00073300	.	1
	C2	,00024900	.	1
	C3	,00048400	.	1
	Total	,00048867	,000242034	3
Total	C1	,00167825	,000783751	4
	C2	,00131025	,001504528	4
	C3	,00152200	,001463072	4
	Total	,00150350	,001180456	12

**Nota.** Los valores de permeabilidad muestran una reducción progresiva y dependiente de la dosis de Xantano.

**Interpretación:** La permeabilidad promedio disminuye desde  $3.29 \times 10^{-3}$  cm/s (clasificado como Permeabilidad Media) en el suelo natural, hasta  $4.89 \times 10^{-4}$  cm/s (clasificado como Permeabilidad Muy Baja) con la dosis del 7% con una reducción de permeabilidad del 85.1%, estos valores justifican el uso del Xantano como tratamiento, transformando la subrasante en una capa con baja permeabilidad que minimizará la infiltración de agua y protegerá la integridad estructural de la subrasante.

### Figura 58

#### *Clasificación de Suelos por Grado de Permeabilidad*

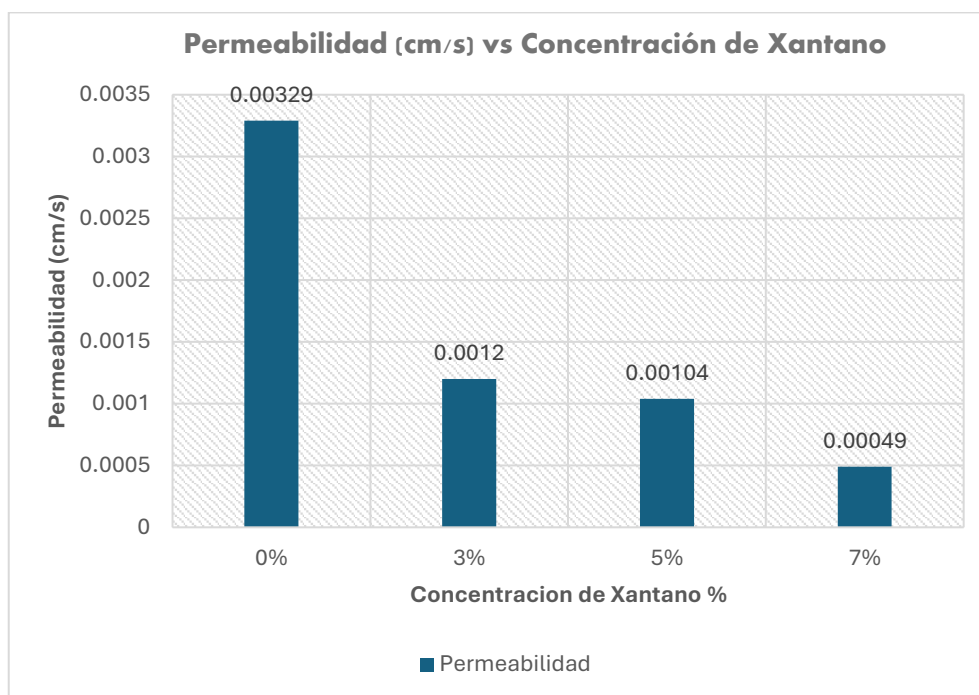
Grado de permeabilidad	Conductividad hidráulica cm/s
Elevada	Superior a $10^{-1}$
Media	$10^{-1}$ a $10^{-3}$
Baja	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Muy baja	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Practicamente impermeable	men or de $10^{-7}$

**Nota.** Clasificación utilizada para interpretar los resultados de permeabilidad del estudio.

Fuente: (Terzaghi & Peck, 1978, p. 53)

## Figura 59

*Efecto de la Concentración de Xantano en la Permeabilidad del Suelo*



**Nota.** Se observa que la permeabilidad disminuye desde  $3.29 \times 10^{-3}$  cm/s (clasificación: Media) en el suelo natural, hasta  $4.9 \times 10^{-4}$  cm/s (clasificación: Muy Baja) con el 7% de Xantano, obteniendo un 85.1% de reducción en la permeabilidad.

**Interpretación:** Para el suelo (SM) con un pH básico ( $\approx 9.8$ ), el Xantano se hidrata y sus grupos carboxilo ( $-\text{COOH}$ ) se ionizan ( $-\text{COO}^-$ ), generando repulsión electrostática que despliega sus cadenas poliméricas y atrapa agua irreversiblemente, formando un gel expansivo. Esta transformación químico-física recubre todas las partículas con una película hidrofílica que neutraliza su superficie natural y atrae agua adicional para crear una matriz cohesiva. Simultáneamente, las cadenas cargadas negativamente interactúan con cationes del agua intersticial, formando una red polimérica reticulada que sella químicamente los poros al obstruir los conductos capilares. Este mecanismo convierte a la subrasante en una capa mecánicamente más competente y esencialmente impermeable. Para nuestras hipótesis **H.E.1** y **H.E.3**, se superan ampliamente ya que el Xantano reduce la permeabilidad

alcanzando un 85.1% con 7% cuadruplicando el umbral del 20% planteado en la hipótesis. Al tener un cambio cualitativo en el comportamiento hidráulico de la subrasante se convierte en una "capa barrera" efectiva a la infiltración de agua, mitigando la erosión y pérdida de capacidad portante.

### 5.1.6 Costo directo por m<sup>2</sup> de suelo tratado

#### Datos:

Longitud del tramo: 1 km = 1,000 metros

Ancho de calzada: 3.8 metros

Espesor de capa: 0.20 metros

Peso del suelo (MDS): 1998 kg/m<sup>3</sup>

#### Multiplicamos:

$$\text{Espesor (m)} \times \text{Peso suelo (kg/m}^3\text{)} = \text{kg de suelo por m}^2$$

$$0.20 \text{ m} \times 1,998 \text{ kg/m}^3 = 399.6 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{kg suelo/m}^2 \times \% \text{ dosis} = \text{kg de Xantano por m}^2$$

$$399.6 \text{ kg/m}^2 \times 0.03 = 11.988 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{kg Xantano/m}^2 \times \text{Precio} = \text{Costo por m}^2$$

$$11.988 \text{ kg/m}^2 \times 46 = \text{s}/.551.45$$

#### Formula general:

$$\text{Costo/m}^2 = \text{Espesor} \times \text{Peso suelo} \times \text{Dosis} \times \text{Precio Xantano}$$

#### Cálculo del peso de Xantano para cada dosis

- Para 3% de Xantano:

$$\text{Costo/m}^2 = 0.20 \times 1,998 \times 0.03 \times 46$$

$$\text{Costo/m}^2 = \text{s}/.551.45$$

- Para 5% de Xantano:

$$\text{Costo}/m^2 = 0.20 \times 1,998 \times 0.05 \times 46$$

$$\text{Costo}/m^2 = = s/.919.08$$

- **Para 7% de Xantano:**

$$\text{Costo}/m^2 = 0.20 \times 1,998 \times 0.07 \times 46$$

$$\text{Costo}/m^2 = = s/.1,286.7$$

Es importante destacar que la implementación del Xantano como estabilizante dependerá de la disposición a priorizar soluciones innovadoras. Aunque el análisis costo-beneficio inicial no favorece su adopción masiva, los resultados técnicos de esta investigación demuestran mejoras significativas que podrían justificar su uso en casos específicos, particularmente en aplicaciones puntuales en puntos críticos de la vía.

## 5.2 Discusión

### **Efecto del Xantano en la Permeabilidad y su Mecanismo de Impermeabilización**

La presente investigación evaluó el efecto del biopolímero Xantano en las propiedades geotécnicas del suelo de la carretera Sullumayo, Quispicanchi, Cusco. Los resultados obtenidos demuestran que el Xantano modifica positivamente la reducción de permeabilidad, plasticidad y la capacidad portante del suelo, lo que valida su potencial como estabilizador e impermeabilizante en suelos de subrasante.

El hallazgo más contundente de este estudio fue la reducción progresiva de la permeabilidad con el aumento de la concentración de Xantano, alcanzando una disminución del 85.1% con la dosis del 7%. Este resultado es coherente y cuantitativamente superior a lo reportado por Mendonça et al. (2021), quienes en su revisión sistemática indicaron que el Xantano puede reducir la permeabilidad del suelo hasta en un 60%. Nuestros valores más altos podrían deberse a las características específicas del suelo limo-arenoso de Sullumayo y a las dosificaciones más elevadas empleadas hasta 7%.

A nivel nacional, este hallazgo se alinea con Achahuanco & Huaman (2022), quienes reportaron que una dosificación del 2.5% de Xantano redujo la absorción de agua en un 6% y la ascensión capilar en un 71% en un suelo de Cusco. Nuestro estudio demuestra que, con dosis mayores, el efecto impermeabilizante puede ser mucho más significativo.

### **Efecto del Xantano en la Plasticidad y Cohesión del Suelo**

El Incremento del Índice de Plasticidad (IP) en un 94% con la dosis del 7% es un indicador clave de la modificación de las propiedades cohesivas del suelo. Este fenómeno es consistente con los "mecanismos de puenteo" descritos por (Jang, 2020), donde las largas cadenas del biopolímero forman puentes físicos entre partículas de suelo, incrementando las fuerzas de cohesión.

Este resultado concuerda plenamente con investigaciones locales. Huamani Mercado (2022) encontró que el IP de una subrasante limosa se incrementó de 5.87% a 21.77% con solo 1% de Xantano, reclasificando el suelo de "regular" a "muy buena" subrasante. De manera similar, Morales Bautista (2024) observó una reducción drástica del IP a más del 96% usando una combinación de goma Guar y Xantana, acercando el suelo a un comportamiento no plástico. Nuestro estudio corrobora este efecto cohesivo, aunque la tendencia en nuestro suelo fue de aumento del IP, lo que sugiere que la respuesta puede variar según el tipo de suelo (en nuestro caso, clasificado como SC-SM/SM), pero en todos los casos, el Xantano modifica sustancialmente los límites de Atterberg.

### **Efecto del Xantano en la Capacidad Portante (CBR)**

El aumento del CBR hasta un 7.5% con la dosis del 5%, aunque no estadísticamente significativo ( $p=0.160$ ), sigue una tendencia de mejora reportada en la literatura, pero con matices importantes. (Acevedo Zambrano & Ahumada Cabarcas, 2024) lograron resistencias a compresión de 1700 kPa (equivalente a un CBR muy alto) con 5% de Goma Xantana y

fibras de polipropileno. La diferencia en la magnitud de la mejora sugiere que el Xantano por sí solo tiene un efecto cementante limitado en comparación con su uso combinado con refuerzos fibrilares.

A nivel local, Tello Gonzales & Caviedes Oscco (2022) reportaron un CBR de 64.9% con solo 1% de Xantano en un suelo de Pisac, Cusco. La discrepancia con nuestros valores más bajos (11.35% máximo) puede atribuirse a la variabilidad natural de los suelos y a la diferente energía de compactación aplicada. Nuestro resultado refuerza la idea de que, si bien el Xantano puede mejorar ligeramente la capacidad portante, su fortaleza principal no radica en reemplazar estabilizantes como el cemento para ganar resistencia, sino en mejorar la durabilidad y resistencia al agua, como concluyó Bagheri et al. (2023).

#### **Efecto del Xantano en la Compactación: Densidad Máxima y Humedad Óptima**

El hecho de que la densidad máxima seca no se viera significativamente afectada por el Xantano es un hallazgo positivo, ya que indica que el biopolímero no perjudica la capacidad de compactación del suelo. Esto coincide con lo observado por Daza Rojas & Miranda Pino (2024), quienes no encontraron cambios significativos en la densidad de un suelo limoso tratado con biopolímeros.

Por otro lado, el aumento en el contenido de humedad óptimo es una consecuencia directa de la naturaleza hidrofílica del Xantano. El biopolímero retiene agua, por lo que se necesita más líquido para lubricar las partículas y alcanzar la máxima densidad durante la compactación. Este comportamiento debe ser considerado crucial en la especificación de obras, ya que el agua de compactación en campo deberá ajustarse para suelos tratados con biopolímeros.

#### **Integración y Relevancia de los Hallazgos**

La dosificación óptima identificada en este estudio para la carretera de Sullumayo (entre 5% y 7%) es superior a la reportada por la mayoría de antecedentes, que suelen oscilar

entre 0.5% y 2.5% (Mendonça et al., 2021; Soldo et al., 2020; Huamani Mercado, 2022). Esto subraya la importancia de los estudios específicos para cada tipo de suelo y región, ya que las condiciones locales (mineralogía, química del agua, clima) influyen en la efectividad del biopolímero.

En conjunto, los resultados validan al Xantano como una alternativa técnicamente viable y sostenible para la estabilización de subrasantes en carreteras de bajo volumen, no tanto por un aumento dramático de la resistencia, sino por su potencial para impermeabilizar el suelo y aumentar su cohesión, mitigando así el principal agente de deterioro vial: el agua.

## VI. Conclusiones

### Conclusión General

La adición del Xantano, al suelo natural de la carretera de Sullumayo, sí afecta las propiedades hidráulicas y mecánicas aceptando parcialmente la **H.G.** En lugar de reducir la resistencia al corte, el Xantano mejora la cohesión del suelo y reduce drásticamente su permeabilidad, sin comprometer su capacidad portante, lo cual se debe a la formación de un gel viscoso y expansivo en el pH básico del suelo ( $\approx 9.8$ ), que recubre las partículas, sella los poros y establece puentes químicos. La concentración óptima identificada es del 7%, ya que reduce en un 85.1% la permeabilidad según los resultados obtenidos evidenciados en la **figura 59** y simultáneamente con la dosificación de 7% se tiene una mejora el Índice de Plasticidad en un 94% evidenciado en la **figura 53**, mientras mantiene la densidad máxima seca y eleva el CBR a un nivel adecuado para subrasantes de caminos rurales de clasificación  $S_3$  (Buena). Por lo tanto, el Xantano se presenta como una alternativa técnica viable para la estabilización de subrasantes, mejorando su comportamiento frente al agua y manteniendo su integridad estructural.

### Conclusión N° 01:

**Respecto al Objetivo Específico 01:** Determinar la relación entre la concentración de Xantano y la permeabilidad del suelo.

Existe una relación inversa y altamente efectiva entre la concentración de Xantano y la permeabilidad del suelo. A mayor concentración de Xantano, menor permeabilidad. Con el 7% de Xantano, la permeabilidad se redujo en un 85.1% respecto al suelo natural como se evidencia en la **figura 59**, superando ampliamente el 20% planteado en la **H.E.3**. Esto valida la **H.E.1**, el efecto es mucho más pronunciado de lo esperado. El mecanismo de sellado químico de poros mediante el gel de Xantano transforma la subrasante en una barrera efectiva contra la infiltración de agua.

**Conclusión N° 02:**

**Respecto al Objetivo Específico 02:** Analizar la variación de la resistencia al corte del suelo con diferentes concentraciones de Xantano.

La resistencia al corte del suelo no disminuye con el aumento de la concentración de Xantano, rechazándose completamente **H.E.2**. Por el contrario, los indicadores de resistencia y cohesión mejoran: el Índice de Plasticidad aumentó un 94% teniendo mayor cohesión evidenciado en la **Tabla 22**, la Densidad Máxima Seca se mantuvo sin tener perjuicio en la compactación y el valor CBR pasó de 9.73% (S<sub>2</sub>- Regular) a 12.36% (S<sub>3</sub>-Buena) evidenciado en la **Figura 56**, lo que indica una mayor capacidad portante y resistencia a esfuerzos (compresión, cortante y tensión). El Xantano actúa como un agente cohesivo que refuerza la matriz del suelo.

**Conclusión N° 03:**

**Respecto al Objetivo Específico 03:** Identificar la concentración óptima de Xantano que minimiza la permeabilidad.

Se evidencio que la permeabilidad promedio disminuye desde  $3.29 \times 10^{-3}$  cm/s (clasificado como Permeabilidad Media) en el suelo natural, hasta  $4.89 \times 10^{-4}$  cm/s (clasificado como Permeabilidad Muy Baja) según (Terzaghi & Peck, 1978). Debido a sus propiedades hidrofílicas y su capacidad de formar puentes de hidrogeno en la matriz del suelo, la concentración óptima de Xantano para minimizar la permeabilidad es del 7%. Con esta concentración se logra una reducción del 85.1% de la permeabilidad evidenciado en la **Tabla 30**, cuadruplicando el umbral del 20% establecido en la **H.E.3**, la cual queda superada y validada. Este porcentaje representa el punto de mayor eficiencia en la formación del gel sellante.

**Conclusión N° 04:**

**Respecto al Objetivo Específico 04:** Identificar la concentración óptima de Xantano que maximiza la resistencia al corte.

La concentración del 5% de Xantano maximiza la resistencia al corte desde un punto de vista técnico y estadístico, al elevar el CBR a un nivel de calidad (S<sub>3</sub> Buena) y mejorar significativamente la cohesión. Sin embargo, la **H.E.4** se rechaza, ya que el incremento máximo en el CBR fue del 7.5% (de 9.73% a 12.36%) evidenciándose en la **Figura 56**, y no del 20% como se había planteado. No obstante, esta mejora es suficiente para garantizar un adecuado desempeño de la subrasante en caminos rurales, combinada con el enorme beneficio de la impermeabilización.

**Conclusión N° 05:**

**Respecto al Objetivo Específico 05:** Respecto a la viabilidad económica.

La viabilidad de utilizar Xantano como estabilizante en ingeniería de carreteras está ligada a la voluntad de adoptar soluciones innovadoras. Si bien su costo inicial puede ser un factor limitante para una aplicación generalizada, la evidencia técnica de esta investigación revela mejoras de desempeño notables. Esto lo convierte en una alternativa justificada para tratamientos puntuales en sectores críticos de la vía, donde sus beneficios técnicos compensan la inversión.

## VII. Recomendaciones

### **Recomendación N° 01:**

Implementar el uso de Xantano al 7% como estabilizador en sectores críticos de la carretera de Sullumayo y vías rurales. La investigación demostró que una concentración del 7% de Xantano minimiza la permeabilidad en un 85.1%, transformando el suelo de "Permeabilidad Media" a "Baja". Por lo que se recomienda su uso específico en taludes y zonas de alta erosión, donde la infiltración de agua compromete la estabilidad y en cunetas y zonas de drenaje adyacente para crear una capa de sellado que proteja la subrasante de la saturación.

### **Recomendación N° 02:**

Incluir al Xantano como una alternativa válida en los estudios de suelos y especificaciones técnicas para estabilización de subrasantes, particularmente cuando el parámetro crítico a controlar es la permeabilidad. Aunque la concentración óptima para maximizar la resistencia (CBR) fue del 5%, la del 7% también eleva la clasificación del suelo a S<sub>3</sub> (Buena), manteniendo la capacidad portante adecuada para caminos rurales. Para su aplicación se recomienda establecer puntos de control de calidad que verifiquen la concentración utilizada y realicen ensayos de densidad con cono de arena para asegurar la compactación.

### **Recomendación N° 03:**

Adoptar una estrategia de aplicación selectiva y justificada, ya que se reconoce que el costo del Xantano es superior al de estabilizadores tradicionales como la cal o el cemento. Su viabilidad no está en el uso masivo, sino en el uso inteligente. Para su aplicación se recomienda su uso en áreas donde los problemas de agua son recurrentes y generan altos costos sociales (aislamiento comunitario, dificultad de accesos a servicios básicos como la educación y salud).

**Recomendación N° 04:**

Profundizar la investigación en durabilidad a largo plazo, comportamiento bajo ciclos de humedad-sequía, congelamiento-descongelamiento típicas de la zona alto andina. Así mismo, desarrollar protocolos de aplicación en campo a mayor escala.

**Recomendación N° 05:**

Investigar el efecto sinérgico del Xantano combinado con otros estabilizantes (cal en bajas proporciones) o refuerzos fibrilares, para desarrollar mezclas que optimicen simultáneamente impermeabilización y resistencia.

### VIII. Referencias

- Acevedo Zambrano, D. S., & Ahumada Cabarcas, A. J. (2024). *Estimacion de las Ecuaciones que Controlan la Rigidez, Resistencia Mecanica y Microestructura de un suelo fino Estabilizado con Goma de Xantana y reforzado con fibra de Polipropileno*. Cartagena - Colombia: Universidad de Cartagena.
- Achahuanco Silva, R., & Huaman Ccorimanya, R. (2022). *Uso del Xantano como material cementante suplementario de suelo cemento en la calle principal de Urpay, Quispicanchi, Cusco, 2021*. Lima - Peru: Universidad Cesar Vallejo.
- Aguilar, L., Gaston, C., Llopiz, J., & Jerez, A. (2005). *Estudio de termoestabilidad de goma Xantano por analisis termico y viscosimetria*, 52-57.
- Badui Dergal, S. (2006). *Quimica de los Alimentos*. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- Bagheri, P., Gratchev, I., & Rybachuk, M. (2023). Effects of Xanthan Gum Biopolymer on Soil Mechanical Properties. *Applied Sciences*, 1-13.
- Caceres Mendoza, K. (2024). “*Comportamiento hidráulico del barraje fijo – fusible de la captación tres molinos – cajamarca, a nivel de modelo fisico*”. Cajamarca -Peru: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA.
- Castro Diaz, E. F., & Juarez Chuquiasta, R. (2024). *Estudio experimental en la estabilización de suelos de baja capacidad portante para caminos no pavimentados utilizando cal natural, ceniza de briquetas de combustión de ladrilleras artesanales y ceniza de cascarilla de arroz, Lambayeque 2024*. Lambayeque - Peru: UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO.
- Chang, I., Im, J., Prasadhi, A., & Cho, G.-C. (2015). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *ELSEVIER*, 65-72.
- Criollo Alcantara, A. (2019). *Evaluacion de la produccion de Xantano en Cultivos por lote por Xanthomonas Campestris 1459 empleando subproductos agroindustriales como fuente de carbono*. Cuidade de Mexico: Instituto Politecnico Nacional.
- Cruz Cruz, H. Y. (2024). *Incorporacion del Biopolimero goma guar en la subrasante de la carretera EMP PE-3S Combapata, tramo 3+000 A 6+000, Combapata, Cusco, 2024*. Huancayo - Peru: Universidad Continental.

- Dagnino S., J. (2014). Bioestadística y Epidemiología - ANÁLISIS DE VARIANZA. *Rev Chil Anest*, 306-310.
- Das, B. (1985). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. California: Internacional Thomson Editores.
- Das, B. M. (2021). *Principles of Geotechnical Engineering (10th ed.)*. Boston, Estados Unidos: Cengage Learning.
- Das, B., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering (Ninth Edition)*. United States of America: Cengage Learning.
- Davila Gomez, U. (2016). *Estudio de las propiedades de fluidos base agua empleados en operaciones de perforación de pozos petroleros utilizando goma xantana líquida en su formulación*. Ciudad de Mexico: Instituto Politecnico Nacional.
- Daza Rojas, L. A., & Miranda Pino, K. G. (2024). *Efecto de Biopolimeros en las propiedades Geotecnicas en Suelos Limosos aplicados a Cimentaciones Superficiales, Distrito de San Sebastian, Cusco, 2022*. Cusco - Peru: Universidad Andina del Cusco.
- Diaz Marin, M. (2023). “*Relación de la resistencia al corte de los suelos de fundación mediante Ensayos de Penetración Estándar (SPT) y compresión simple en la zona de expansión urbana localidad el tambo bambamarca - hualgayoc - cajamarca, 2022*”. Cajamarca - Peru: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineerting Practice*. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Garcia Toro, J. R. (2019). *Estudio de la Tecnica de Suelo-Cemento para la Estabilizacion de vias terciarias en Colombia que posean un Alto Contenido de Caolin*. Bogota - Colombia: Universidad Catolica de Colombia.
- Hernandez-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN: LAS RUTAS CUANTITATIVA, CUALITATIVA Y MIXTA*. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Herrera Cahuana, S. L., & Roqqe Raffo, S. F. (2025). *Evaluación de aplicación de polímeros comestibles como recubrimiento del jengibre (Zingiber officinale) fresco para mantener su calidad en anaquel*. La Merced - Peru: UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN.

- Huamani Mercado, A. L. (2022). *“Incorporacion de goma Xanthan para mejorar las propiedades de la subrasante limosa, calle Santa Eulalia, San Sebastian, Cusco - 2022”*. Lima - Peru: Universidad Cesar Vallejo.
- Jacobs, M. (2014). *Análisis estructural y bioquímico de la proteína de membrana externa GumB de Xanthomonas campestris, y su participación en la síntesis del exopolisacárido xantano*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Jang, J. (2020). A Review of the Application of Biopolymers on Geotechnical Engineering and the Strengthening Mechanisms between Typical Biopolymers and Soils. *Advances in Materials Science and Engineering*, 01-17.
- Jaramillo J., D. F. (2002). *Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Medellín*. Medellin: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Lopez Zapana, R. L. (2018). *“Evaluacion del coeficiente de permeabilidad efectivo en depositos cuaternarios e implicancias en los diseños de presas alto andinas, casos cusco y apurimac”*. Arequipa - Peru: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa .
- Mendonça, A., Morais, P., Pires, A. C., & Oliveira, P. V. (2021). A Review on the Importance of Microbial Biopolymers Such as Xanthan Gum to Improve Soil Properties. *Applied Sciences*, 1-14.
- Ministerio de Transportes. (2016). *Manual de ensayo de Materiales*. Lima - Peru: MTC.
- Morales Bautista, N. R. (2024). *Estabilizacion de suelo cohesivo de la subrasante en la avenida Yuracoto, mediante goma guar-xantana, Caraz, Ancash, 2023*. Huaraz - Peru: Universidad Cesar Vallejo.
- MTC. (2014). *Manual de Carreteras suelos Geologia, Geotecnia y Pavimentos. Seccion Suelos y Pavimentos R.D N°10-2014-MTC/14*. Lima - Peru: Servicios Gráficos Squadrito EIRL.
- MTC, M. (2023). *Instructivo de la Ficha Técnica Estándar para la Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión en Carreteras Interurbanas*. Lima - Peru: MTC.
- Muñasqui Crisostomo, J. J. (2023). *Caracterizacion y mejoramiento de suelos criticos en la subrasante para garantizar la estabilidad del pavimento en la carretera Nicacaca -*

- Huachon - 2023*. Cerro de Pasco - Peru: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion.
- Perez Duran, A. M., & Serrano Sierra, R. (2024). *Analisis del Comportamiento Mecanico de un suelo Fino Mezclado con Pavimento Asfaltico reciclado (RAP) y estabilizado con Goma Xantana*. Cartagena - Colombia: Universidad de Cartagena.
- Porta Rutte, Y. Y. (2023). *Efectos de la energía de compactación durante el ensayo proctor modificado en un mejoramiento vial en la provincia de huancayo*. Huancayo: Universidad Peruana los Andes.
- Portilla Yandún, F. P. (2021). "Efecto de adición de partículas de caucho reciclado en las propiedades físico – mecánicas de suelos granulares". Ambato - Ecuador: Universidad Tecnica Ambato.
- Ramos Maldonado, F. L. (2020). *Estudio del comportamiento reológico de la goma de celulosa, goma xantana y goma guar y sus interacciones en mezclas binarias y ternarias en disoluciones acuosas a diferentes condiciones del medio*. Medellin - Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Samame Zatta, V. E. (2021). "Aplicación de los aditivos proes y conaid y su relación con la mejora del cbr en la subrasante de la carretera pilluana - paraíso, provincia de picota, departamento de san martin". Tarapoto - Peru: Universidad Cientifica del Peru.
- Soldo, A., Miletic, M., & Auad, M. L. (2020). Biolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. *SCIENTIFIC REPORTS*, 1-13.
- Tejeira Berrios, J. D. (2024). *Efecto de la Utilizacion de Residuo Avicola y Biopolimero de fermentacion Bacteriana para Mejorar las Propiedades Mecanicas y de Impermeabilidad en suelos Arensos Limosos como Subrasante de Carreteras*. Lima - Peru: Universidad San Ignacio de Loyola.
- Tello Gonzales, A. N., & Caviedes Oscoco, D. J. (2022). *Influencia del biopolímero xantana en el mejoramiento de las propiedades de la subrasante en el tramo cruzpampa - huallak'ata en la c.c. mask'a-pisac-cusco-2022*. Cusco - Peru: Universidad Andina del Cusco.

Terzaghi, K., & Peck, R. (1978). *Mecanica de suelos en la Ingenieria Practica - Segunda Edicion*. España: EL ATENEO S.A.

Vertiz Sosaya, M. E. (2023). *Efecto de pH y concentración de la goma xantana en las características reológicas de una jalea light de aguaymanto (Physalis peruvian L.)*. Trujillo - Peru: Universidad Cesar Vallejo.

Whitlow, R. (1994). *Fundamentos de Mecanica de Suelos*. Mexico: Compañía Editorial Continental, S.A de C.V.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes