



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS UTILIZANDO EL  
ADITIVO ÓRGANOSILANOS A NIVEL DE SUBRASANTE EN LA  
PISTA DE SALIDA CUSCO – JULIACA, 2023.**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**CRISTIAN VICTOR CHAVEZ AZA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PUNO - PERÚ**

**2024**



# CRISTIAN VICTOR CHAVEZ AZA

## ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS UTILIZANDO EL ADITIVO ÓRGANOSILANOS A NIVEL DE SUBRASANTE EN LA ...

Universidad Nacional del Altiplano

### Detalles del documento

Identificador de la entrega  
tm:oid::10159:73999852

142 Páginas

Fecha de entrega  
13 dic 2024, 1:27 p.m. GMT-5

24,413 Palabras

Fecha de descarga  
13 dic 2024, 1:34 p.m. GMT-5

129,675 Caracteres

Nombre de archivo  
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS UTILIZANDO EL ADITIVO ÓRGANOSILANOS A NIVEL DE ...pdf

Tamaño de archivo  
3.2 MB

Vors  
  
13/dic/2024  
 Ing. Jaime Víctor Chávez  
DOCENTE UNIVERSITARIO  
COD. UNA N° 910548  
SUBDIRECTOR INV EPIC



## 14% Similitud general

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

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

### Fuentes principales

- 14% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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.

  
Mg. FAUSTO P. MAMANI MAMANI  
INGENIERO CIVIL  
C.I.P. 38080

VºBº  
  
13/dic/2024  
Ing. Jaime M. Sa Leiva  
DOCENTE UNIVERSITARIO  
COD. UNA Nº 910546  
SUBDIRECTOR INV FPIC





## DEDICATORIA

*A quienes me dieron la vida y con ella, no solo el aliento, sino la esperanza y la fortaleza.*

*Dos seres de luz que caminan juntos, pero cada uno con su propio paso y destino.*

*Sus nombres, como el eco de un sueño, rebotan en mi corazón, aunque no se pronuncien directamente.*

*Uno de ellos, su alma es como un roble, firme en su ser, siempre protegiendo con valentía.*

*Su voz, profunda como el río que no olvida, serena, siempre tiene la palabra precisa.*

*En sus manos, la fuerza de mil tormentas, pero en su mirada, la calma que da paz.*

*Quien lleva el nombre de un rey, y al mismo tiempo, el de quien todo lo da sin pedir.*

*El otro, es como el viento suave, que acaricia las flores con su toque tierno. Su amor es un refugio cálido, un faro que nunca se apaga, incluso en la tormenta. Su corazón, como la luna llena, brilla con luz suave pero constante. Su nombre, guardián de los recuerdos, siembra dulzura donde pisa y hace florecer la esperanza.*

*Ellos, sin saberlo, fueron mis primeros maestros, y, como las estrellas que guían a los navegantes, con sus enseñanzas se alza mi destino, una vida construida sobre el amor y la entrega.*

**CRISTIAN VICTOR CHAVEZ AZA**



## AGRADECIMIENTOS

Deseo manifestar mi más sincero agradecimiento a la EPIC de la UNAP. Esta institución no solo me proporcionó las herramientas académicas indispensables para mi formación profesional, sino también un entorno enriquecedor que favoreció mi desarrollo personal y profesional. Su compromiso con la excelencia y la calidad educativa ha representado una inagotable fuente de inspiración a lo largo de mi camino.

Deseo dedicar un reconocimiento especial a mis padres, quienes han sido el pilar más sólido en mi vida. Su apoyo emocional constante, sus sabios consejos y su incansable esfuerzo para ofrecerme los recursos necesarios han sido fundamentales para alcanzar esta meta. No existen palabras suficientes para expresar mi gratitud hacia ellos; este logro también es fruto de su dedicación y amor incondicional.

Finalmente, dedico este logro a quienes, de manera directa o indirecta, dejaron una marca positiva en mi vida. Su generosidad, paciencia y constante motivación fueron elementos esenciales para la culminación de esta etapa. A todos ustedes, mi más profundo y sincero agradecimiento.

*Cristián Víctor Chávez Aza*



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>17</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>20</b>
1.2.1. Problema general.....	20
1.2.2. Problemas específicos .....	20
<b>1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>21</b>
1.3.1. Hipótesis general.....	21
1.3.2. Hipótesis específicas .....	21
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>22</b>
<b>1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>24</b>
1.5.1. Objetivo general .....	24
1.5.2. Objetivo específico.....	24

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA



<b>2.1.</b>	<b>ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>26</b>
2.1.1.	Antecedentes internacionales .....	26
2.1.2.	Antecedentes nacionales .....	28
2.1.3.	Antecedentes locales .....	30
<b>2.2.</b>	<b>BASES TEÓRICAS .....</b>	<b>32</b>
2.2.1.	Pavimento.....	32
2.2.2.	Subrasante .....	32
2.2.3.	Suelos cohesivos .....	35
2.2.4.	Estabilización de suelos .....	35
2.2.5.	Estabilización mecánica .....	36
2.2.6.	Estabilización química .....	36
2.2.7.	Aditivo órganosilano .....	36
2.2.7.1.	Especificaciones del aditivo Órganosilanos.....	42
2.2.7.2.	Beneficios técnicos del aditivo Órganosilanos .....	43
2.2.8.	Plasticidad de los suelos.....	47
2.2.9.	Granulometría de suelo .....	48
2.2.10.	Método SUCS para la clasificación de suelos.....	50
2.2.11.	Clasificación de suelos método AASHTO.....	54
2.2.12.	Compactación de los suelos .....	57
2.2.13.	Ensayo CBR .....	58
2.2.14.	Permeabilidad de suelos .....	59
2.2.15.	Conductividad hidráulica .....	60
2.2.16.	Ensayo para caracterizar la transmisión de fluidos en laboratorio.....	60
2.2.16.1.	Prueba de carga constante .....	60
2.2.16.2.	Prueba de caída de carga .....	61



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1. METODOLOGÍA .....</b>	<b>64</b>
3.1.1. Tipo de investigación .....	64
3.1.2. Nivel de investigación .....	64
3.1.3. Diseño de investigación .....	65
3.1.4. Población.....	65
3.1.5. Muestra.....	66
3.1.5.1. Método de muestreo.....	67
3.1.6. Recolección de datos.....	68
3.1.7. Operacionalización de variables.....	68
<b>3.2. MATERIALES.....</b>	<b>70</b>
3.2.1. Ubicación Geográfica.....	70
3.2.2. Suelo de Consistencia Blanda .....	72
3.2.3. Aditivo químico Órganosilanos .....	74
<b>3.3. ORIGEN DEL MATERIAL EMPLEADO.....</b>	<b>74</b>
3.3.1. Muestreo del suelo .....	74
3.3.2. Aditivo químico Órganosilanos .....	74
<b>3.4. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO NATURAL.....</b>	<b>75</b>
3.4.1. Humedad Natural .....	75
3.4.2. Límite Líquido.....	76
3.4.3. Límite Plástico.....	80
3.4.4. Proctor Modificado .....	82
3.4.5. Valor Relativo De Soporte (CBR) .....	86
3.4.6. Permeabilidad.....	93





## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. HIPÓTESIS GENERAL.....</b>	<b>97</b>
4.1.1. Comportamiento del nivel de influencia en la estabilización .....	97
<b>4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1 .....</b>	<b>98</b>
4.2.1. Resistencia al esfuerzo .....	98
4.2.2. Estadísticos descriptivos de CBR.....	102
<b>4.3. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2 .....</b>	<b>103</b>
4.3.1. Expansión.....	103
4.3.2. Estadísticos descriptivos de expansión .....	109
<b>4.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3 .....</b>	<b>111</b>
4.4.1. Permeabilidad del suelo .....	111
4.4.2. Estadísticos descriptivos de permeabilidad.....	113
<b>4.5. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 4 .....</b>	<b>115</b>
4.5.1. Límites de consistencia .....	115
4.5.2. Estadísticos descriptivos de índice de plasticidad.....	118
<b>4.6. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 5 .....</b>	<b>120</b>
4.6.1. Estadísticos descriptivos de Densidad.....	123
<b>4.7. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 6 .....</b>	<b>125</b>
4.7.1. Estadísticos descriptivos de Humedad saturada.....	128
<b>4.8. DISCUSIÓN .....</b>	<b>129</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>131</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>134</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>136</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>140</b>



**ÁREA:** Geotecnia

**TEMA:** Estabilización

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Geotecnia

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 18 de diciembre de 2024



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Suelo tratado y no tratado con aditivo órganosilanos.....	37
<b>Figura 2</b> Permeabilidad de los suelos.....	43
<b>Figura 3</b> Absorción capilar en presencia y ausencia del aditivo órganosilanos.....	45
<b>Figura 4</b> Gráfico de plasticidad.....	51
<b>Figura 5</b> Diagrama para clasificación de suelo de granulometría gruesa (% grava > % arena).....	52
<b>Figura 6</b> Diagrama para clasificación de suelo de granulometría gruesa (% arena ≥ % grava).....	53
<b>Figura 7</b> Plasticidad aplicada en la clasificación. ....	56
<b>Figura 8</b> Principio de compactación. ....	57
<b>Figura 9</b> Curva del suelo de California del ensayo de CBR. ....	59
<b>Figura 10</b> Prueba de permeabilidad de carga constante.....	61
<b>Figura 11</b> Prueba de permeabilidad de caída de carga.....	62
<b>Figura 12</b> Ubicación del tramo, km: 01+300 al km: 03+500.....	66
<b>Figura 13</b> Ubicación de los puntos: C-1, C-2, C-3. ....	67
<b>Figura 14</b> Extracción de material, C – 1. ....	70
<b>Figura 15</b> Extracción de material, C – 2. ....	71
<b>Figura 16</b> Extracción de material, C – 3. ....	71
<b>Figura 17</b> Flujograma del procedimiento de contenido de humedad.....	75
<b>Figura 18</b> N° de golpes vs contenido de humedad.....	77
<b>Figura 19</b> N° de golpes vs contenido de humedad.....	78
<b>Figura 20</b> N° de golpes vs contenido de humedad.....	79
<b>Figura 21</b> Compactación de suelos cohesivos y no cohesivos.....	82
<b>Figura 22</b> Gráfica a escala natural de contenido de humedad vs densidad seca. ....	84
<b>Figura 23</b> Gráfica a escala natural de contenido de humedad vs densidad seca. ....	85
<b>Figura 24</b> Gráfica a escala natural de contenido de humedad vs densidad seca. ....	86
<b>Figura 25</b> Gráfico de CBR C-1, suelo natural.....	89
<b>Figura 26</b> Gráfico de CBR C-2, suelo natural.....	91
<b>Figura 27</b> Gráfico de CBR C-3, suelo natural.....	93
<b>Figura 28</b> Ensayos realizados vs permeabilidad. ....	94



<b>Figura 29</b>	Ensayos realizados vs permeabilidad. ....	95
<b>Figura 30</b>	Ensayos realizados vs permeabilidad. ....	96
<b>Figura 31</b>	CBR al 100%. ....	98
<b>Figura 32</b>	Dosificación de órganosilanos vs CBR, C-1. ....	99
<b>Figura 33</b>	Dosificación de órganosilanos vs CBR, C-2. ....	100
<b>Figura 34</b>	Dosificación de órganosilanos vs CBR, C-3. ....	101
<b>Figura 35</b>	Relación entre tiempo y expansión para la muestra C-1. ....	104
<b>Figura 36</b>	Dosificación de órganosilanos vs expansión en la muestra C-1. ....	105
<b>Figura 37</b>	Relación entre tiempo y expansión para la muestra C-2. ....	106
<b>Figura 38</b>	Dosificación de órganosilanos vs expansión en la muestra C-2. ....	107
<b>Figura 39</b>	Relación entre tiempo y expansión para la muestra C-3. ....	108
<b>Figura 40</b>	Dosificación de órganosilanos vs expansión en la muestra C-3. ....	109
<b>Figura 41</b>	Órganosilanos vs permeabilidad para la muestra C-1. ....	111
<b>Figura 42</b>	Órganosilanos vs permeabilidad para la muestra C-2. ....	112
<b>Figura 43</b>	Órganosilanos vs permeabilidad para la muestra C-3. ....	113
<b>Figura 44</b>	Límites de consistencia en la muestra C-1. ....	116
<b>Figura 45</b>	Límites de consistencia en la muestra C-2. ....	117
<b>Figura 46</b>	Límites de consistencia en la muestra C-3. ....	118
<b>Figura 47</b>	Densidad seca saturada, muestra C-1. ....	120
<b>Figura 48</b>	Densidad seca saturada, muestra C-2. ....	121
<b>Figura 49</b>	Densidad seca saturada, muestra C-3. ....	122
<b>Figura 50</b>	Humedad saturada, muestra C-1. ....	125
<b>Figura 51</b>	Humedad saturada, muestra C-2. ....	126
<b>Figura 52</b>	Humedad saturada, muestra C-3. ....	127



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Categorías de subrasante.....	33
<b>Tabla 2</b> Categorización de suelos basada en el índice de plasticidad. ....	48
<b>Tabla 3</b> Criterio de separación del suelo por tamaños. ....	49
<b>Tabla 4</b> Clasificación de suelos para suelos basada en AASHTO M 145 y/o ASTM D3282-93, 2004. ....	55
<b>Tabla 5</b> Permeabilidad y condiciones de drenaje de los suelos. ....	63
<b>Tabla 6</b> Coordenadas UTM del inicio y final del tramo. ....	66
<b>Tabla 7</b> Cantidad de puntos de análisis del tramo.....	67
<b>Tabla 8</b> Operacionalización de variables. ....	69
<b>Tabla 9</b> Coordenadas UTM de los puntos.....	70
<b>Tabla 10</b> Propiedades del suelo natural de la calicata 1 (C-1).....	72
<b>Tabla 11</b> Propiedades del suelo natural de la calicata 2 (C-2).....	73
<b>Tabla 12</b> Propiedades del suelo natural de la calicata 3 (C-3).....	73
<b>Tabla 13</b> Características del aditivo órganosilanos.....	74
<b>Tabla 14</b> Límite líquido C-1, suelo natural.....	77
<b>Tabla 15</b> Límite líquido C-2, suelo natural.....	78
<b>Tabla 16</b> Límite líquido C-3, suelo natural.....	79
<b>Tabla 17</b> Límite plástico. ....	80
<b>Tabla 18</b> Límite plástico. ....	81
<b>Tabla 19</b> Límite plástico. ....	81
<b>Tabla 20</b> Tipos de suelo. ....	83
<b>Tabla 21</b> Proctor modificado C-1, suelo natural.....	83
<b>Tabla 22</b> Proctor modificado C-2, suelo natural.....	84
<b>Tabla 23</b> Proctor modificado C-3, suelo natural.....	85
<b>Tabla 24</b> Expansión del suelo natural. ....	87
<b>Tabla 25</b> Penetración de CBR C-1, suelo natural. ....	88
<b>Tabla 26</b> Expansión del suelo natural. ....	89
<b>Tabla 27</b> Penetración de CBR C-2, suelo natural. ....	90
<b>Tabla 28</b> Expansión del suelo natural. ....	91
<b>Tabla 29</b> Penetración de CBR C-3, suelo natural. ....	92



<b>Tabla 30</b>	Permeabilidad de C-1.....	94
<b>Tabla 31</b>	Permeabilidad de C-2.....	95
<b>Tabla 32</b>	Permeabilidad de C-3.....	96
<b>Tabla 33</b>	Índice de CBR, C-1, C-2 y C-3.....	97
<b>Tabla 34</b>	Resultados de C*-1. ....	99
<b>Tabla 35</b>	Resultados de CBR, C-2. ....	100
<b>Tabla 36</b>	Resultados de CBR, C*-3. ....	101
<b>Tabla 37</b>	Dosificación de órganossilanos según Análisis de varianza para el CBR... ..	102
<b>Tabla 38</b>	Análisis comparativo de Dunnett CBR vs Órganossilanos. ....	102
<b>Tabla 39</b>	Resultados de expansión para la muestra C-1.....	103
<b>Tabla 40</b>	Resultados de expansión para la muestra C-2.....	105
<b>Tabla 41</b>	Resultados de expansión para la muestra C-3.....	107
<b>Tabla 42</b>	Análisis de varianza para la expansión según dosificación de órganossilanos. .....	109
<b>Tabla 43</b>	Comparación de medias de mínimos cuadrados para expansividad. ....	110
<b>Tabla 44</b>	Prueba de medias de Tukey, $\alpha = 0.05$ . ....	110
<b>Tabla 45</b>	Permeabilidad para la muestra C-1.....	111
<b>Tabla 46</b>	Permeabilidad para la muestra C-2.....	112
<b>Tabla 47</b>	Permeabilidad para la muestra C-3.....	113
<b>Tabla 48</b>	Comparación de medias de la permeabilidad. ....	114
<b>Tabla 49</b>	Prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. ....	114
<b>Tabla 50</b>	Prueba de Medias de Tukey, $\alpha = 0.05$ .....	115
<b>Tabla 51</b>	Límites de consistencia obtenidos para la muestra C-1.....	115
<b>Tabla 52</b>	Límites de consistencia obtenidos para la muestra C-2.....	116
<b>Tabla 53</b>	Límites de consistencia obtenidos para la muestra C-3.....	117
<b>Tabla 54</b>	Análisis de varianza aplicado al índice de plasticidad.....	119
<b>Tabla 55</b>	Comparación de medias por mínimos cuadrados del índice de plasticidad. .....	119
<b>Tabla 56</b>	Densidad seca saturada de la muestra C-1.....	120
<b>Tabla 57</b>	Densidad seca saturada de la muestra C-2.....	121
<b>Tabla 58</b>	Densidad seca saturada de la muestra C-3.....	122
<b>Tabla 59</b>	Análisis de varianza aplicado a la densidad seca saturada.....	123
<b>Tabla 60</b>	Comparación de medias de mínimos cuadrados para densidad seca saturada. .....	124



<b>Tabla 61</b>	Prueba de medias de Tukey, $\alpha = 0.05$ .....	124
<b>Tabla 62</b>	Humedad saturada de la muestra C-1. ....	125
<b>Tabla 63</b>	Humedad saturada de la muestra C-2. ....	126
<b>Tabla 64</b>	Humedad saturada de la muestra C-3. ....	127
<b>Tabla 65</b>	Análisis de varianza aplicado a la humedad saturada.....	128



## ACRÓNIMOS

AASHTO:	American Association Standards Highway Transportation Officials
ASTM:	American Society for Testing and Materials
CBR:	California Bearing Ratio (Relación de Soporte California)
CHO:	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
DSM:	Densidad seca máxima
EG:	Especificaciones Técnicas Generales para Construcción
EPIC:	Escuela profesional de Ingeniería Civil
FICA:	Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura
GSD:	Grain Size Distribution (Curva Granulométrica)
IP:	Índice de plasticidad
LMSM:	Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales
LP:	Límite plástico
LL:	Límite líquido
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
NTP:	Norma Técnica Peruana
RNE:	Reglamento Nacional de Edificaciones
RULT:	Reglamento de Uso de Laboratorio y Talleres de la UNA, Puno
EPP:	Equipo de protección personal
UNAP:	Universidad Nacional del Altiplano





## RESUMEN

El proyecto busca mejorar la estabilidad de los suelos arcillosos en las carreteras, ya que su presencia afecta la calidad de las infraestructuras viales. Estos suelos no cumplen con los requisitos técnicos para ser adecuados como base de soporte, lo que deteriora las propiedades de resistencia y estabilidad necesarias para el buen funcionamiento de las vías. El objetivo principal fue determinar en qué medida influye el aditivo órganossilano en la estabilización de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco–Juliaca. La metodología fue de tipo de investigación básica o pura, con un enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño experimental (experimento puro). Los resultados mostraron que los suelos tenían índices de plasticidad de 12.51%, 34.77% y 27.31%. El ensayo de Proctor modificado, las densidades secas fueron de 1.884, 1.536 y 1.797 g/cm<sup>3</sup>, y el contenido de humedad óptimo fue de 13, 23 y 16% respectivamente. Los valores de CBR fueron de 3.10, 4.10 y 3.60%, mientras que la permeabilidad resultó en 2.981E-04, 1.116E-04 y 1.028E-04. Con la incorporación de órganossilano de 0.5, 1.0 y 1.5 l/m<sup>3</sup>, se logró una mejora en las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos, con un descenso significativo en su plasticidad, a partir de 8.14% a un 2.63%, de un 33.78% a un 31.75%, y de un 26.12% a un 23.61%. A su vez, la resistencia de los suelos al esfuerzo mostró un aumento significativo, pasando de un 8.80 a un 18.40%, de un 8.70 a un 11.10%, y de un 6.70 a un 10.30% de CBR, lo que sugiere que el material es adecuado para ser clasificado como buena. Además, se registró una disminución en la permeabilidad. Por lo tanto, la utilización de órganossilanos como material estabilizador es una opción económicamente viable, sostenible y con un impacto ambiental positivo.

**Palabras clave:** Aditivo órganossilanos, CBR, Estabilización, Arcilla, Subrasante.



## ABSTRACT

The project seeks to improve the stability of clay soils on roads, as their presence affects the quality of road infrastructure. These soils do not meet the technical requirements to be suitable as a support base, which deteriorates the strength and stability properties necessary for the proper functioning of roads. The main objective was to determine to what extent the additive organosilane influences the stabilisation of clayey soils at subgrade level on the Cusco-Juliaca exit road. The methodology was of the basic or pure research type, with a quantitative approach, explanatory level and experimental design (pure experiment). The results showed that the soils had plasticity indices of 12.51%, 34.77% and 27.31%. The modified Proctor test, dry densities were 1.884, 1.536 and 1.797 g/cm<sup>3</sup>, and the optimum moisture content was 13, 23 and 16% respectively. The CBR values were 3.10, 4.10 and 3.60%, while the permeability values were 2.981E-04, 1.116E-04 and 1.028E-04. With the incorporation of 0.5, 1.0 and 1.5 l/m<sup>3</sup> organosilane, an improvement in the mechanical properties of the clayey soils was achieved, with a significant decrease in their plasticity from 8.14% to 2.63%, from 33.78% to 31.75%, and from 26.12% to 23.61%. In turn, the resistance of the soils to stress showed a significant increase from 8.80 to 18.40%, from 8.70 to 11.10%, and from 6.70 to 10.30% CBR, suggesting that the material is suitable to be classified as good. In addition, a decrease in permeability was recorded. Therefore, the use of organosilanes as a stabilising material is an economically viable, sustainable option with a positive environmental impact.

**Keywords:** Órganosilanos additive, CBR, Stabilization, Clay, Subgrade.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las pistas presentan una serie de problemáticas que afectan su estabilidad y durabilidad. Una de las principales dificultades es la heterogeneidad de los suelos, lo que significa que pueden variar en cuanto a su composición, densidad, resistencia y capacidad de carga. Esta heterogeneidad dificulta el diseño y conservación de las vías de comunicación, ya que se requiere un cuidado especializado para lidiar con las diferentes condiciones del suelo a lo largo de la ruta.

La plasticidad de los suelos es otra problemática común en las carreteras. Los suelos con alta plasticidad, como los arcillosos, tienden a cambiar de volumen en respuesta a las fluctuaciones de humedad. Esto puede dar lugar a deformaciones, hundimientos y fisuras en la superficie de la carretera, lo que afecta su nivel de servicio y seguridad. Además, la plasticidad de los suelos puede complicar la correcta compactación durante la construcción, lo que compromete la habilidad para soportar la estructura vial. El potencial de carga del terreno es otra preocupación importante en las carreteras. Los suelos de baja capacidad de carga, como los limos y las arenas sueltas, pueden no proporcionar una base sólida para la estructura vial. Esto puede resultar en asentamientos diferenciales, deformaciones y daños prematuros en la carretera. La falta de capacidad de carga adecuada también puede limitar la capacidad de la carretera para soportar cargas pesadas, como el tráfico de vehículos de carga, lo que afecta la eficiencia del transporte y aumenta los costos de mantenimiento. La erosión y la inestabilidad del suelo son problemáticas adicionales en las carreteras. Los suelos expuestos a condiciones climáticas adversas, como fuertes lluvias o inundaciones, pueden ser propensos a la



erosión. Esto puede resultar en la pérdida de material del suelo y la formación de socavones en la superficie de la carretera. además, la inestabilidad del suelo puede llevar a deslizamientos de tierra y colapsos, esto supone un peligro para la seguridad de los usuarios de la vía.

Por último, la presencia de suelos expansivos representa una problemática significativa en las carreteras. Los suelos expansivos, como las arcillas, es posible que sufran variaciones de volumen significativos respondiendo a las fluctuaciones de humedad. Estos cambios pueden provocar movimientos laterales y verticales en la estructura vial, lo que lleva a grietas, deformaciones y deterioro prematuro. La expansividad del suelo puede ser especialmente problemática en regiones con climas secos y húmedos alternantes.

Surgiendo las siguientes preguntas:

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema general**

¿En qué medida influye el aditivo órganosilanos en la estabilización de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023?

### **1.2.2. Problemas específicos**

¿Cuál es el nivel de influencia del aditivo órganosilanos en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023?

¿Cómo favorece el aditivo órganosilanos en la expansividad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023?



¿Cuáles son los efectos que genera el aditivo órganosilanos en la permeabilidad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023?

¿Cuál es el índice de plasticidad cuando se utiliza órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023?

¿Cuál es el nivel de densidad cuando se utiliza órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023?

¿Cuál es el nivel de humedad cuando se utiliza órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023?

### **1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.1. Hipótesis general**

El aditivo órganosilanos tiene un alto nivel de influencia en la estabilización de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

#### **1.3.2. Hipótesis específicas**

La capacidad de soporte de los suelos arcillosos a nivel de subrasante de la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023 se incrementa significativamente por la influencia del aditivo órganosilanos.



El aditivo órganosilanos favorece significativamente en la expansividad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

Los efectos que genera el aditivo órganosilanos en la permeabilidad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023, son positivos.

Al utilizar órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas se obtiene un índice de plasticidad óptimo para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

Al utilizar órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas se mejora la densidad para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

Al utilizar órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas se obtiene una humedad óptima para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El desgaste y deterioro de las vías rehabilitadas en las zonas de sierra está directamente relacionado con el uso de materiales de cantera que, debido a sus características, no cumplen en gran medida con los parámetros establecidos en las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG 2013). Esta problemática exige la búsqueda de alternativas que permitan optimizar las propiedades físicas-químicas de los materiales empleados.



La técnica estabilización se utiliza para mejorar las características físicas y mecánicas de los materiales, donde los suelos presentan condiciones desfavorables para la construcción de infraestructura vial. Tradicionalmente, insumos como la cal y el cemento han demostrado ser efectivos en estos procesos; sin embargo, los avances tecnológicos permiten explorar nuevos aditivos químicos, como los organosilanos, que ofrecen ventajas adicionales en términos de rendimiento y sostenibilidad.

En nuestra región, las investigaciones relacionadas con la estabilización química de suelos, en particular utilizando tecnologías modernas como los organosilanos, son limitadas. Este insumo, que actúa a nivel molecular modificando la estructura del terreno, posee el potencial de incrementar de manera considerable la capacidad portante, reducir la expansión y mejorar la permeabilidad de los suelos arcillosos, aspectos críticos para el diseño de subrasantes en carreteras. Además, su aplicación es de especial relevancia en la pista de salida Cusco – Juliaca, un corredor vial estratégico que conecta importantes ciudades del sur del Perú y que actualmente experimenta un alto tránsito de vehículos pesados, lo que acelera el deterioro de su estructura.

El presente proyecto se enfoca en evaluar el impacto de los organosilanos en el proceso de estabilización de la subrasante con suelos arcillosos en tramos específicos de la pista mencionada. La elección de este aditivo responde tanto a su efectividad técnica como a su viabilidad económica en comparación con otros métodos tradicionales, como el empleo de cal o cemento. Asimismo, al introducir organosilanos en la estabilización de suelos, no solo se busca mitigar los problemas actuales de deterioro vial, sino también generar una alternativa innovadora que contribuya al desarrollo de nuevas prácticas en el campo de la ingeniería geotécnica.

El tramo que se está analizando abarca un promedio de 2 .00 km.



## **1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar en qué medida influye el aditivo órganosilanos en la estabilización de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

### **1.5.2. Objetivo específico**

Determinar el nivel de influencia del aditivo órganosilanos en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

Establecer cómo favorece el aditivo órganosilanos en la expansividad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

Determinar cuáles son los efectos que genera el aditivo órganosilanos en la permeabilidad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

Determinar cuál es el índice de plasticidad cuando se utiliza órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.

Determinar cuál es la densidad cuando se utiliza órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.





Determinar cuál es el nivel de humedad cuando se utiliza órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

###### **India**

El estudio publicado por Nallamothu y Achuthan (2023) señalan que: El objetivo es mejorar las propiedades de resistencia y permeabilidad del suelo de algodón negro, o suelo expansivo de arcilla de alta plasticidad (CH), mediante la combinación del suelo con fibra de coco y aditivos Terrasil. Las proporciones de Terrasil y fibra de coco empleadas en este estudio son 0.5% de Terrasil y 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0% de fibra de coco, respectivamente. El suelo de subrasante de arcilla estabilizado con 0.5% de Terrasil y 1.5% de fibra de coco presenta valores específicos de resistencia y una mejora en el valor de CBR. El intervalo de confianza UCS para la aplicación combinada de suelo + 0.5% Terrasil + 1.5% de fibra de coco aumenta de 26.566 kPa a 27.209 kPa en comparación con el suelo sin tratar. Además, el valor de CBR calculado para el suelo tratado es generalmente un 90% superior al del suelo no tratado, lo que reduce las capas necesarias para la subrasante. Los valores de permeabilidad para el 1,5% y 2,0% de fibra de coco y el 0,5% de Terrasil superan los del suelo no tratado. Una vez incorporados los aditivos al suelo, se investiga la mineralogía del suelo y los fenómenos del mecanismo de Bonding mediante XRD, SEM y FTIR. (p. 1)

###### **México**



Moreno (2018) afirma en su estudio que: Los agregados reciclados provenientes del hormigón demolido pueden emplearse como estabilizadores de terrenos arcillosos, teniendo en cuenta la alcalinidad a la pasta de cemento que se halla adherida a los incorporados pétreos iniciales. Se describieron de manera química y mineralógica cuatro fragmentos de materiales reciclados derivados de desechos de obras y demoliciones en la ciudad de México: grava y arena de una fábrica de reciclaje y agregados reciclados, además de una muestra de suelo feozem háplico de Pachuca. Los hallazgos señalan que únicamente la grava reciclada tiene los niveles de minerales y alcalinidad requeridos para ser reconocida como un agente de estabilización. (p. xiii)

### **Ecuador**

Rodríguez (2016) indica que: Se realizó un mejoramiento de la subrasante de una vía ecológica con el producto biodegradable (Terrasil), mejorando el grado de compactación y disminuyendo la humedad del suelo, haciéndolo impermeable sin afectar las propiedades índices y físicas del suelo. Los resultados muestran que, tras 7 días, la capacidad portante del suelo se incrementó en un 14%, mientras que la humedad descendió un 27.86%. El estudio sugiere que optar por insumos pétreos para optimizar la ruta implica un gasto mayor en comparación con este insumo, ya que se prescinde del gasto en logística de transporte. (p. xiv)

### **India**

Tal como señalan Patel et al. (2015) en su publicación: El objetivo fue analizar los cambios en las propiedades del suelo sin tratar, así como el impacto de la adición del 0.041% de Terrasil en el suelo sin tratar de peso seco, el cual se utilizará para la subrasante en proyectos de desarrollo de carreteras. Los resultados



indican que, para un suelo CL, tanto el límite líquido como el plástico se reducen al añadir 0.041% de Terrasil. Los valores de CBR del suelo tratado aumentan, lo cual se debe a que, con el 0.041% de Terrasil, se mejoran los valores de densidad al reducirse las ratios de vacíos. (p. 77, 83)

### **Guatemala**

Como menciona Ruano (2012) en su análisis: Se Evaluó como influyen las arenas volcánicas y la cal viva para incrementar las propiedades de los suelos cohesionados. Las proporciones asociadas con arena en las mezclas variaron entre el 10%, 25% y 50%, resultando en valores de CBR que oscilaron entre el 52.6% y el 91.5%. Los resultados demostraron que tanto la arena de sílice como la azul mejoran el CBR; sin embargo, debido a la mayor gravedad específica y la composición de los minerales de la arena azul, esta última alcanza indicadores ligeramente superiores a los de la arena de sílice. Las diferentes estabilizaciones muestran que es posible emplear estas arenas de procedencia volcánico incorporando un 10% de cal viva, permiten conseguir estabilizaciones con cifras variadas. (p. xvii, 106)

#### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

##### **Junín**

En el estudio desarrollado por Martínez (2020) se plantea que: El objetivo fue determinar la influencia del aditivo órganosilanos en un suelo cohesivo estabilizado a nivel de la subrasante. Las proporciones de órganosilanos empleadas en este estudio son de 0.5, 1.0 y 1.5 l/m<sup>3</sup> para un CBR natural de 5.53%, mejorando el CBR a un 14.84%, 24.94% y 46.24% con dosificaciones de 0.5, 1.0



y  $1.5 \text{ l/m}^3$ , respectivamente. Se concluye que la estabilización de suelos cohesivos se ve mejorada por el uso del aditivo organosilano. (p. xi, 67)

### **Amazonas**

Goicochea (2019) menciona que: El objetivo fue determinar las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos a nivel de subrasante con la adición de enzimas orgánicas. Se analizaron las propiedades físicas y mecánicas del suelo con las enzimas biodegradables funcionando como agente estabilizante en cantidades de 1/1000, 1/900 y 1/800. Los análisis indican que la aplicación de enzimas orgánicas en el suelo da lugar a una mejora en su plasticidad, de acuerdo con los límites de Atterberg, pasando de una plasticidad alta a una plasticidad media. Asimismo, se observa un comportamiento favorable del CBR, que alcanza su punto máximo en 1/900, decreciendo al llegar a 1/800. Se concluye que la proporción de biocatalizadores orgánicos 1/900 tiene un mayor impacto en la resistencia CBR del suelo. (p.xiv, 46)

### **Huancavelica**

Ponce (2017) en esta tesis indica que: El objetivo fue determinar la influencia del uso del cloruro de calcio para la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos, utilizando proporciones de 2%, 4%, 5%, 6% y 8% de cloruro de calcio en relación al peso del suelo. Los resultados determinaron que el uso del 5% de cloruro de calcio consiguió el mayor incremento en el %CBR, aumentando de 11.80% a 16.50%, lo que representa una mejora de 4.7% con el uso del  $\text{CaCl}_2$ . (p. xv, 84, 123)

### **Lima**



Villanueva (2017) indica que: El objetivo fue establecer la mejor opción de estudios experimentales a nivel de laboratorio para estabilizar los suelos de una vía de bajo volumen de tránsito, a partir de las dosificaciones necesarias de poliacrilamida aniónica, órganosilanos o compuestos sulfonados. Se utilizaron proporciones de 0.005%, 0.01% y 0.02% de poliacrilamida aniónica en peso; 0.02%, 0.03% y 0.05% de órganosilanos en peso; y 0.005%, 0.01% y 0.02% de compuestos sulfonados en peso. Los resultados muestran que el valor de %CBR con el estabilizador de órganosilanos incrementa hasta un 76.7%, mientras que el estabilizador de polyacrylamide logra un 50.2% y el estabilizador sulfurado alcanza un 69.5%. Se concluye que el estabilizador de sulfonados presenta el mejor funcionamiento, de acuerdo con la prueba de durabilidad efectuada. (p. 4, 16, 55-56, 72-73)

### **2.1.3. Antecedentes locales**

#### **Juliaca**

Jara (2024) indica que: La finalidad fue analizar la incidencia sobre la mejora de suelos arcillosos a través de la integración de restos de madera (aserrín), utilizando concentraciones de 5, 12, 18 y 25%. Los resultados demuestran que la incorporación de aserrín incrementa de manera notable el comportamiento mecánico de los suelos arcillosos, reduciendo la plasticidad hasta en un 31%. Además, se observó un incremento en la carga máxima soportable del suelo, logrando indicadores de CBR que van de un 7.32% a 14.50% en la muestra C-1 y de 6.20% a 14.27% en la muestra C-2. (p. 18, 160)

#### **Tiquillaca**



Livise (2023), en su tesis, plantea que: En objetivo fue establecer la cantidad y el porcentaje óptimos de cal viva para optimizar las características del suelo, incrementando la resistencia de carga de la subbase. Utilizando proporciones de 2%, 4%, 6% y 8% de cal viva, se obtuvieron cambios significativos en las propiedades mecánicas, incrementando el CBR a 73%, 104%, 80% y 71%, en ese orden. Se concluyó que la porción ideal de cal es del 4%. (p. 15)

### **Cochiraya**

Flores y Mamani (2022), es su trabajo de investigación, argumentan que: El objetivo consistió en analizar el impacto de neumáticos reciclados de caucho granular para optimizar la eficiencia de terrenos con características arcillosas en la base de la carretera, incorporando porcentajes de caucho reciclado granular de 1.5%, 2%, 3% y 4%, aplicados en los puntos de análisis 01, 02 y 03. Los resultados indicaron que la combinación óptima fue de 4% de caucho granular, obteniendo valores como un índice de plasticidad (IP) de 11% y un CBR de hasta 13.4%. (p. viii, 24, 43, 44)

### **Juliaca**

Zapana (2022) plantea en su tesis que: El objetivo fue mejorar los suelos arcillosos mediante la incorporación de polímeros reciclados para la subrasante, aplicando proporciones del 1% y 3% en relación al peso total de la muestra en tres calicatas. Los resultados indicaron que, para el CBR natural, se obtuvieron valores de 7.5%, 7.4% y 7.8% en las calicatas C-1, C-2 y C-3, respectivamente, siendo la dosificación de 3% la más óptima, logrando valores de CBR de hasta 9.15%, 8.26% y 8.60%. (p. xiii, 84, 105, 108, 116, 120, 128, 132)

## **Puno**

Ramos (2022), en su trabajo de tesis, señala que: El objetivo fue evaluar las propiedades geotécnicas para uso vial de un suelo fino de consistencia blanda al incorporarle Terrasil, utilizando dosificaciones de 0.2, 0.8, 1.4, 2.0 l/m<sup>3</sup> de Terrasil. Los resultados mostraron un CBR natural de 5.0%, el cual se incrementó a 6.6% con una dosificación de 0.2 l/m<sup>3</sup> y hasta 16.4% con una dosificación de 2.0 l/m<sup>3</sup>. Asimismo, el (IP) del suelo natural, que era de 23.5%, alcanzo un valor menor a 22.7% con una dosificación de 0.2 l/m<sup>3</sup> y hasta 15.2% con una dosificación de 2.0 l/m<sup>3</sup>. (p. 15, 85)

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. Pavimento**

Vivar (1991) dice que “el pavimento es un elemento estructural compuesto por una o varias capas que se apoya en toda su superficie. Su diseño y construcción están destinados a garantizar su funcionalidad a lo largo de su vida útil” (p. 1).

Montejo (1998) dice que “un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados” (p. 1).

### **2.2.2. Subrasante**

Montejo (1998) afirma en su libro que: El espesor del pavimento depende de la calidad de la subrasante, ya sea un pavimento flexible o rígido. Las variaciones en el volumen de los suelos expansivos en la subrasante pueden afectar gravemente la estructura que se encuentra sobre ellos. Otra solución a este





problema es estabilizar dicho suelo con algún tipo de aditivo. En nuestro contexto local, la estabilización de suelos con cal da mejores resultados. (p. 9)

Se considera cuando el CBR de los suelos sea igual o superior a 6% son apropiados para la conformación de la subrasante.

### Tabla 1

*Categorías de subrasante.*

<b>Categorías de Subrasante</b>	<b>*CBR</b>
S <sub>0</sub> : Subrasante inadecuada	(3% > CBR)
S <sub>1</sub> : Subrasante insuficiente	(6 > CBR ≥ 3%)
S <sub>2</sub> : Subrasante regular	(10% > CBR ≥ 6%)
S <sub>3</sub> : Subrasante buena	(20% > CBR ≥ 10%)
S <sub>4</sub> : Subrasante muy buena	(30% > CBR ≥ 20%)
S <sub>5</sub> : Subrasante excelente	(CBR ≥ 30%)

Nota: \*CBR significa "California Bearing Ratio" (Relación de Soporte de California).

Las características relevantes del suelo que deben ser consideradas se especifican a continuación:

#### a) Cambios volumétricos

Como destaca Montejo (1998) en su libro: La variación de volumen en los suelos, originada por la variabilidad de la humedad, podría presentarse de manera rápida o estar asociada con los cambios de estación. Por lo tanto, si no se controla la expansión debido al aumento de humedad, esto puede generar ocasiones graves cambios y fisuras en el pavimento. (p. 76)

#### b) Resistencia



Generalmente, los suelos tienen menor resistencia a medida que aumenta su humedad, salvo algunas excepciones. Los suelos arcillosos, al perder agua, logran resistencias superiores cuando se someten a temperaturas altas. Además, en función de la cantidad de humedad y la potencia empleada utilizada en el proceso de densificación, es posible lograr diversas resistencias en un suelo arcilloso.

### **c) Permeabilidad**

En los suelos, la conductividad hidráulica se presenta en dos aspectos fundamentales: la liberación de las presiones en los poros y el paso de agua por el material. La presión excesiva en los vacíos del suelo puede causar deslizamientos en las superficies niveladas, y la corriente de agua puede generar canalizaciones y erosión.

### **d) Compresibilidad**

La compresión en los suelos puede estar sujeta a importantes variaciones, dependiendo de elementos como la relación entre la carga aplicada y la previamente soportada, así como el intervalo de tiempo que transcurre antes de aplicar la carga una vez disipadas las presiones de poro excedentes.

### **e) Durabilidad**

Un aspecto importante que falta en las investigaciones sobre estabilización se debe a la falta de ensayos adecuados para evaluar la vida útil. Dado que la resistencia en el tiempo se reconoce como un factor difícil de medir, la práctica común ha sido sobredimensionar, aunque esto no siempre sea la alternativa más correcta. (p. 76-80)



### **2.2.3. Suelos cohesivos**

Según la investigación de Jiménez (1990): Estos suelos, que contienen partículas pequeñas y una proporción suficiente de arcilla para que el suelo se compacte, son conocidos como suelos expansivos debido a su capacidad de experimentar cambios volumétricos según la humedad. Los asentamientos que experimentan las estructuras, debido a las deformaciones causadas por cargas adicionales sobre el suelo de apoyo, han sido reconocidos como factores que provocan daño en las estructuras. Estos daños pueden no ser únicamente el resultado de asentamientos, sino también de la expansión del suelo. (p. 125)

### **2.2.4. Estabilización de suelos**

Según lo descrito por Montejo (1998) en su libro: Cuando se menciona la estabilización de un suelo, también se está haciendo referencia a su mejora, la cual implica modificar sus propiedades en su ubicación actual con el fin de aumentar su resistencia y durabilidad. Esto se lleva a cabo con el fin de conseguir un suelo de cimentación para la ruta que cumpla con los requisitos necesarios o que incluso los supere. (p. 75)

MTC (2014) dispone en su manual que: Se entiende como el fortalecimiento de las características físicas de un terreno utilizando técnicas de mecanización y la inclusión de sustancias químicas, orgánicas o artificiales. Este proceso se aplica en suelos de subrasante insuficientes o inapropiados; en tales casos, se denomina como estabilización con suelo-cemento, cal, asfalto y otros agentes variados. (p. 89)



### **2.2.5. Estabilización mecánica**

Vivar (1991) explica en su libro que “las mezclas de suelos son una forma de estabilización mecánica, y es por su importancia y frecuencia de uso que han sido tratadas de forma separada” (p. 84).

Menéndez (2009), en su libro, define el concepto de estabilización mecánica como “la mejora de las propiedades del suelo por densificación o por mejora de sus características granulométricas mediante la mezcla con otro material” (p. 19).

Das (2015) describe en su libro que “las metodologías de estabilización mecánica buscan mejorar el suelo mediante procedimientos físicos, sin emplear aditivos ni otras formas de cohesión artificial” (p. 266).

### **2.2.6. Estabilización química**

Das (2015) menciona en su libro “que la estabilización química en su enfoque aplica sustancias químicas para optimizar el desempeño del suelo, incrementando su practicidad y eficacia como recurso constructivo” (p. 266).

### **2.2.7. Aditivo órganosilano**

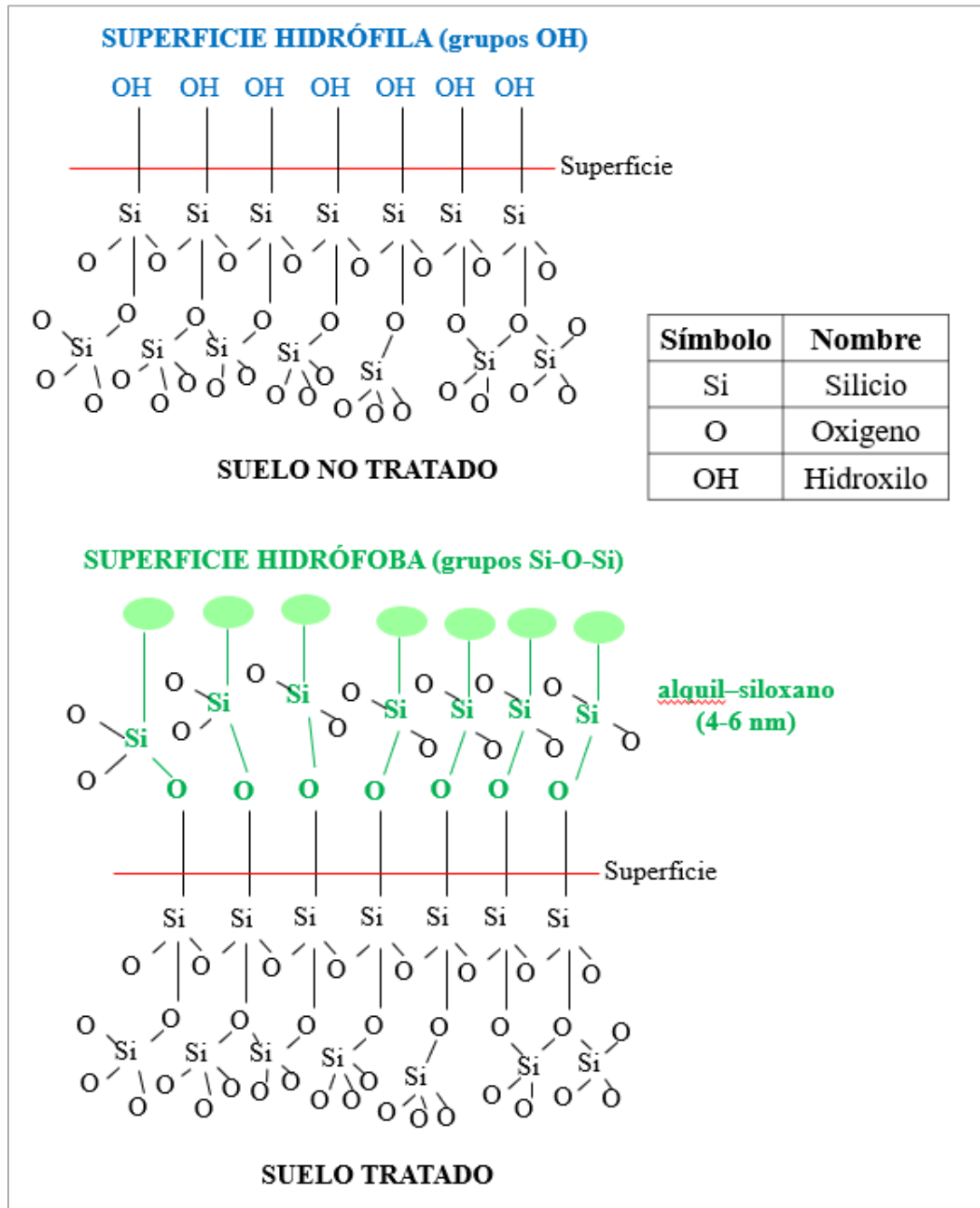
Zydex (s.f.) en su ficha técnica describe que el Terrasil “es un modificador de suelo fácil de aplicar que reduce permanentemente el potencial de hinchazón e infiltración de agua en los suelos” (párr. 1).

La ficha técnica de Brem (s.f.) señala que “Terrasil Este aditivo para suelos, hecho al 100% de órganosilanos, tiene la capacidad de repeler el agua y evitar el hinchamiento y la absorción del suelo. Asimismo, actúa como un

impermeabilizante que añade ventajas extra a los métodos tradicionales de estabilización de suelos” (párr. 1).

**Figura 1**

*Suelo tratado y no tratado con aditivo órganosilanos.*



Nota: De la Ficha Técnica, Terrasil Brem Environmental Solutions S.A.C.

La figura 1 representa de cómo cambia la superficie de un suelo cuando es tratado con un aditivo basado en alquil-siloxano:



### **Para un suelo no tratado:**

#### a) Superficie Hidrófila (Grupos OH):

Los grupos hidroxilo (OH) en la superficie de los minerales del suelo son muy polares debido a la electronegatividad del oxígeno. Esta polaridad permite que las moléculas de agua se adhieran fácilmente a través de enlaces de hidrógeno, una interacción intermolecular fuerte. Esta característica hidrófila hace que los suelos no tratados tiendan a absorber y retener agua, favoreciendo fenómenos como la expansión y reducción de la estabilidad mecánica del suelo.

#### b) Estructura Molecular de la Superficie:

Los suelos suelen estar compuestos de minerales de arcilla y otros componentes que incluyen una red tridimensional de átomos de silicio (Si) y oxígeno (O). Esta estructura forma enlaces Si-O-Si, donde cada silicio está asociado a cuatro oxígenos en una configuración tetraédrica. Los enlaces Si-O son covalentes y muy estables, lo que proporciona al suelo una base estructural robusta. Los grupos OH suelen adherirse a algunos átomos de silicio en la superficie de estos minerales, aumentando su afinidad por el agua y haciéndolos susceptibles a la humedad.

#### c) Interacción con el Agua:

La presencia de grupos OH hace que la superficie del suelo interactúe con el agua a través de enlaces de hidrógeno. Estos enlaces provocan la absorción de humedad, lo que puede afectar las propiedades



mecánicas del suelo, ya que la presencia de agua en la estructura intersticial puede alterar la cohesión entre las partículas de suelo.

**Para un suelo tratado:**

a) Superficie Hidrófoba (Grupos Si-O-Si):

El tratamiento con alquil-siloxano consiste en una reacción química en la cual los grupos hidroxilo (OH) en la superficie del suelo reaccionan y se sustituyen por enlaces Si-O-Si, donde el oxígeno está unido a grupos alquilo. Este proceso elimina la afinidad del suelo por el agua y crea una superficie hidrófoba, lo que significa que repele el agua y reduce su capacidad de absorber humedad. Esta modificación es fundamental para aplicaciones de estabilización de suelos, donde la resistencia a la humedad es crucial para la durabilidad del suelo en ambientes húmedos.

b) Alquil-Siloxano (4-6 nm):

Los aditivos de alquil-siloxano suelen incluir grupos alquilo (como el metilo o etilo), que son cadenas no polares. Estas cadenas alquilo disminuyen la polaridad de la superficie del suelo tratado, limitando así la atracción de las moléculas de agua. La capa de alquil-siloxano, con un grosor de aproximadamente 4 a 6 nanómetros, cubre la superficie de las partículas del suelo. Esta capa hidrofóbica actúa como una barrera, dificultando la entrada de agua y aumentando la resistencia del suelo a la humedad.



c) Estructura de Enlace Si-O-Si en Alquil-Siloxano:

En el alquil-siloxano, el enlace Si-O-Si mantiene la estructura básica de los enlaces del suelo, pero ahora con la incorporación de cadenas alquilo que no presentan afinidad por el agua. Este cambio a una estructura Si-O-Si- reduce la energía superficial de la superficie del suelo, haciendo que el agua sea incapaz de formar enlaces de hidrógeno efectivos con esta estructura. Esto convierte al suelo en un material mucho más estable frente a variaciones de humedad.

d) Implicaciones Físico-Químicas:

La conversión de una superficie hidrófila a una hidrófoba mediante el tratamiento de alquil-siloxano tiene un efecto notable en las propiedades del suelo, tales como la cohesión, la permeabilidad y la resistencia al cambio de volumen. Los suelos tratados tienden a ser menos propensos a la expansión y la contracción debidas a variaciones en la cantidad de agua, lo que es favorable para su uso en aplicaciones estructurales y de construcción, ya que se mejora su capacidad de soporte.

Reacciones Químicas Involucradas en el Tratamiento de Alquil-Siloxano

a) Hidroxilación y Deshidroxilación:

Durante el proceso de tratamiento, los grupos OH en la superficie pueden reaccionar con el alquil-siloxano a través de un proceso de condensación, donde se elimina agua y se forma un enlace Si-O-Si.





Esta reacción convierte los puntos activos hidrofílicos en áreas hidrófobas de manera estable y duradera.

b) Formación de Enlaces Si-C:

En algunos casos, los aditivos de alquil-siloxano contienen grupos alquilo que se enlazan directamente a los átomos de silicio en la superficie del suelo, generando enlaces Si-C. Estos enlaces covalentes adicionales con los grupos alquilo contribuyen a la durabilidad del tratamiento hidrofóbico y a la estabilidad del suelo tratado frente a la humedad.

Beneficios Prácticos de la Hidrofobicidad en Suelos Tratados

a) Reducción de la Expansión y Contracción:

La capacidad hidrofóbica de los suelos tratados con alquil-siloxano previene la entrada de agua en los poros del suelo, lo que reduce las expansiones y contracciones del suelo. Esto es crucial en el diseño de suelos estabilizados para carreteras y cimientos, donde la estabilidad dimensional es un requerimiento esencial.

b) Incremento de la Capacidad de Carga:

Al evitar la acumulación de agua, el suelo tratado mantiene su integridad estructural, permitiendo que soporte cargas más altas sin degradarse. Este beneficio es especialmente importante en proyectos de ingeniería geotécnica, donde la capacidad estructural del suelo es un factor determinante en la fase de diseño.



El aditivo órganosilanos posee la capacidad de estabilizar suelos lo que significa que puede convertir un suelo inestable en uno estable de manera química y duradera, sin que se pierda la porosidad, evita la penetración del agua, eleva el CBR y reduce la degradación del suelo.

La formulación órganosilana, tiene una reacción química con diversos suelos, y su efecto más destacado es impermeabilizar las partículas del suelo. Esta modificación química transforma el suelo en uno que repela las partículas de agua, lo que evita la alteración en el volumen de un suelo, previniendo la expansión. De igual manera nos ofrece las principales ventajas: mayor fuerza de compresión unitaria, aumento respecto a la densidad y control de la absorción de líquidos.

- El suelo adquiere propiedades hidrófobas (rechazando el fluido y previniendo las dificultades asociadas a ella).
- El suelo mantiene su capacidad de expulsar agua (en forma de vapor).
- Reduce la plasticidad en los suelos.

#### **2.2.7.1. Especificaciones del aditivo Órganosilanos**

- Gran eficiencia a precio accesible.
- No requiere aparatos especializados.
- Adecuado para suelos con poca resistencia
- 100% ecológico.
- No representa un riesgo para el medio ambiente.
- No tóxico para el ecosistema.

- Seguro en su uso y manejo.

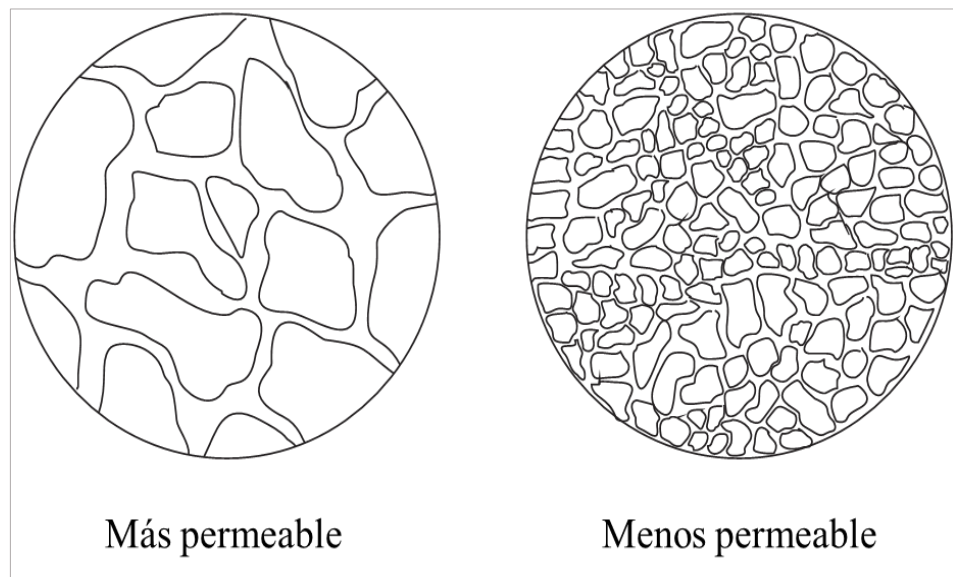
### 2.2.7.2. Beneficios técnicos del aditivo Órganosilanos

#### a) Suelos hidrófobos

Mediante el uso del aditivo órganosilanos en la estabilización de suelos, los grupos silanol del reactivo provocan un cambio químico en los silicatos del suelo, otorgándole propiedades hidrófobas permanentes. La permeabilidad del suelo generalmente está determinada por el tamaño y la conectividad de los poros. Un suelo con poros grandes y una buena red de conexiones permitirá un flujo rápido del agua. Por otro lado, los suelos arcillosos, que tienen poros más pequeños y una conectividad igual, exhibirán una baja permeabilidad, lo que hace que el agua fluya más lentamente a través de ellos.

#### Figura 2

*Permeabilidad de los suelos.*



Nota: Ficha técnica de bases de suelos fuertes, resistentes al agua y flexibles.



### **b) Eleva el valor del índice CBR**

El Índice de resistencia ofrece datos sobre la resistencia de un terreno capaz de resistir cargas, considerando su estado, densidad, humedad y la carga adicional aplicada.

Al agregar el estabilizador, logramos mantener el suelo seco, lo que resulta en una mayor fricción entre las partículas y, en consecuencia, maximiza las características físicas asociadas al someterse a compresión.

### **c) Aumento de la densidad**

Los suelos estabilizados con aditivo órganosilanos logran alcanzar densidades altas con menos energía para compactar y menor agua requerida. Esto se debe a la reacción del órganosilano con el suelo, que modifica sus propiedades recubriendo las partículas, favoreciendo una mayor facilidad de movimiento lo que resulta en una mejor organización de sus partículas.

### **d) Evita que el agua sea absorbida**

Haciendo que el suelo repela el agua, evitaremos la absorción capilar. Lo que garantiza que el suelo permanezca seco y mantenga una alta fricción entre las partículas, sin importar la humedad presente en la capa más profunda.

### Figura 3

*Absorción capilar en presencia y ausencia del aditivo órganosilanos.*



Nota: Ficha técnica de Órganosilanos.

El reactivo en el suelo modifica el factor de drenaje AASHTO 93, aumentando el nivel hasta alcanzar el umbral más alto de 1.40%.

#### **e) Utilización en diversos tipos de suelos**

Los radicales silanol, al interactuar mediante los silicatos en el terreno, la capa se modifica. Esta reacción permite a la molécula adherirse a diversos tipos de suelos con composición arcillosa, arenosos, limos, lateritas y zahorras.

#### **f) Reduce al mínimo la expansión volumétrica del suelo**

El aditivo órganosilanos, al aplicarse y nanosiliconizar el suelo previene la humedad del árido, lo que a su vez evita la expansión de las partículas. Esto conduce a un suelo donde la expansión o hinchamiento es mínimo o nula en su totalidad.



### **g) Previene el arrastre de materiales finos**

La ausencia de agua en la superficie y la elevada fricción entre las partículas impiden cualquier movimiento de materiales finos evitando así posibles pérdidas de densidad localizadas.

### **h) Viabilidad económica**

Tecnología costo-efectiva. La aplicación del aditivo órganosilanos optimiza los recursos financieros gracias a:

- Aplicación de órganosilanos en concentraciones bajas (0.2-2 l/m<sup>3</sup>)
- El importante incremento en las especificaciones técnicas obtenidas. Según los puntos tratados, el costo es más bajo que el de usar cemento y cal para estabilización, e incluso más económico que recurrir a materiales extraídos de cantera.

### **i) Mejoras en el rendimiento operativo**

El agente reactivo es simple de aplicar, siguiendo el proceso estándar de estabilización húmeda, lo que permite alcanzar el rendimiento típico esperado de la maquinaria fluctúa entre 1000 y 5000 m<sup>2</sup>/hora.

### **j) Beneficio ecológico**

La viabilidad a largo plazo y el efecto ambiental beneficioso se refiere a la práctica de minimizar el uso de recursos limitados y prolongar la vida útil de los materiales. A través de esta innovación se consigue:

- Aprovechar los recursos disponibles en el lugar.



- Optimizar el uso de recursos sin recurrir a la cantera.
- Reducir el impacto ambiental por el transporte de materiales.
- Aumentar el tiempo de servicio de la infraestructura.

Existen múltiples razones por las cuales el producto no impacta de forma negativa:

- La impermeabilidad del producto asegura su estabilidad en el subsuelo.
- El producto presenta una composición ecológica, sin metales ni agentes tóxicos.

#### **2.2.8. Plasticidad de los suelos**

Crespo (2007) menciona que:

La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. A través de este método se evalúa el comportamiento de los suelos a lo largo del tiempo. Los límites de Atterberg se utilizan para analizar la plasticidad de un suelo, clasificando así los cuatro estados de consistencia.

Los mencionados límites son: Límite Líquido (L.L.), Límite Plástico (L.P.) y Límite de Contracción (L.C.), y mediante ellos se puede dar una idea del tipo de suelo en estudio. Los límites de consistencia se establecen utilizando un suelo que pasa la malla N° 40. El Índice Plástico (I.P.) se obtiene de la diferencia entre el límite líquido (L.L.) y el límite plástico (L.P.). La cantidad y tipo de arcilla del

suelo influyen en los valores de los límites líquido y plástico, mientras que el índice plástico generalmente depende de la cantidad de arcilla. (p. 69)

**Tabla 2**

*Categorización de suelos basada en el índice de plasticidad.*

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
$IP^* > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$7 < IP \leq 20$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	No Plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Nota: \*IP es el Índice de Plasticidad.

### 2.2.9. Granulometría de suelo

Como afirma Das (2015) en su texto:

El estudio mecánico implica la determinación de la variedad de tamaños de partículas en un suelo, representados como un porcentaje del peso seco total. Usualmente, se utilizan dos procedimientos para obtener la distribución del tamaño de las partículas del suelo: (1) tamizado para partículas de más de 0.075 mm de diámetro, y (2) hidrometría para partículas de menos de 0.075 mm. (p. 33)

Según lo propuesto por Terzaghi y Peck (1963) en su documento:

El propósito del análisis mecánico o análisis granulométrico es determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo y fijar, en porcentaje de su peso total, la cantidad de granos de distintos tamaños que contiene. La técnica más sencilla para dividir un suelo en fracciones, de distinto tamaño es hacerlo ser clasificado mediante un juego de tamices. (p. 18)



**Tabla 3**

*Criterio de separación del suelo por tamaños.*

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas)	<0.075

Nota: Presenta las diferentes dimensiones según la institución. Extraído de los conocimientos de ingeniería geotécnica (p.28), por B. M. Das, 2015, Cengage Learning Editores, S.A.



Para la clasificación de partículas de grava y arena, se emplea el método por tamizado (ASTM D6913 - 17). Sin embargo para partículas de menor tamaño, se requiere el uso de técnicas más elaboradas, al igual que al utilizar un densímetro (ASTM D7928 - 21).

#### **2.2.10. Método SUCS para la clasificación de suelos**

Se señala que este enfoque se utilizará para clasificar los suelos en función de sus características fundamentales, tales como el tamaño de las partículas y las propiedades de los límites de Atterberg. En primera instancia, el suelo se clasifica en dos categorías principales:

Suelos en los que menos del 50% de su peso pasa a través de la malla N°200, lo que indica una composición principalmente de grava y arena.

Suelos en los que más del 50% de su peso pasa a través de la malla N°200: lo que sugiere una composición mayormente de arcilla o limo.

Por lo tanto, el primer paso consiste en determinar el porcentaje de finos presentes en el suelo.

Luego, se procede a determinar las distribuciones de peso de la grava, arena, limo y arcilla; lo que, requiere llevar a cabo un ensayo de granulometría. Este ensayo implica el uso de una serie de tamices específicos para separar el suelo en diferentes grupos:

Para la grava: se utiliza una porción que pasa a través de la malla de 76.2 mm, que queda atrapada en la malla N°4 (4.75 mm).

Para la arena: se toma el material que pasa a través de la malla N°4 y es retenido por la malla N°200.

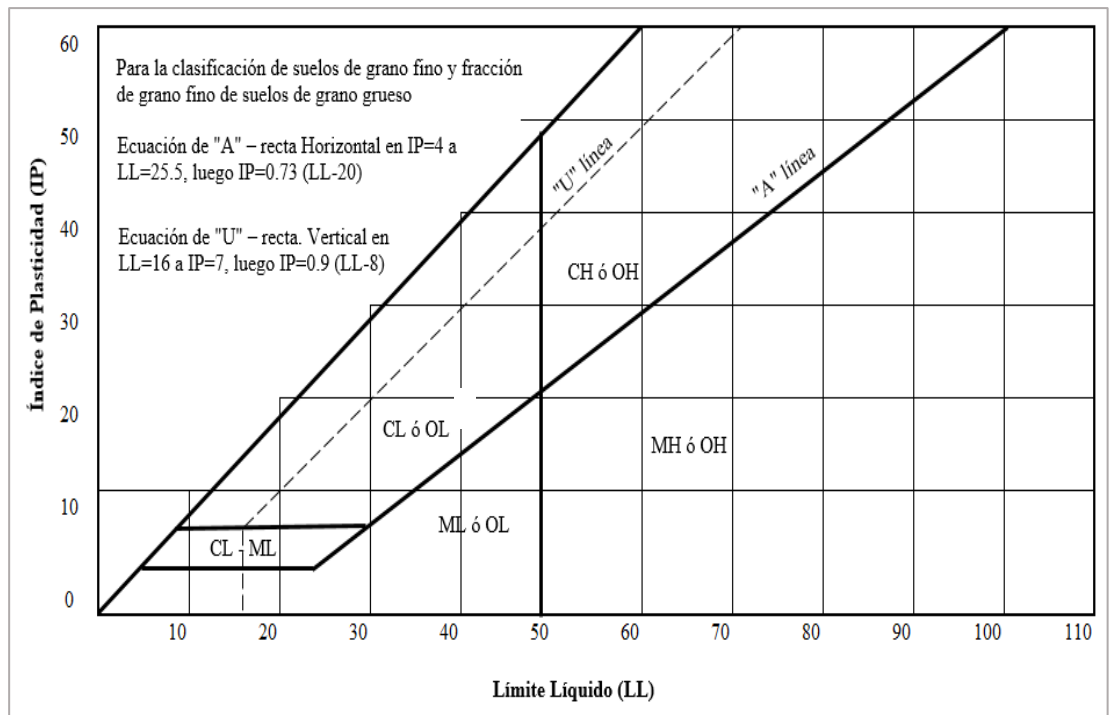
Para arcilla y el limo: se utiliza el material que pasa a través de la malla N°200.

Además, Es conveniente realizar pruebas para conocer los límites de Atterberg que incluyen el límite de consistencia líquida y límite plástico.

Por lo tanto, el procedimiento para clasificar el suelo dependerá del porcentaje superior al 50% del peso total del material. Para suelos finos, donde más de la mitad del suelo pasa a través de la malla N° 200, se empleará la figura 5; por otro lado, para suelos que superan el 50% del material queda retenido por la malla N° 200 se utilizará la figura 6.

#### Figura 4

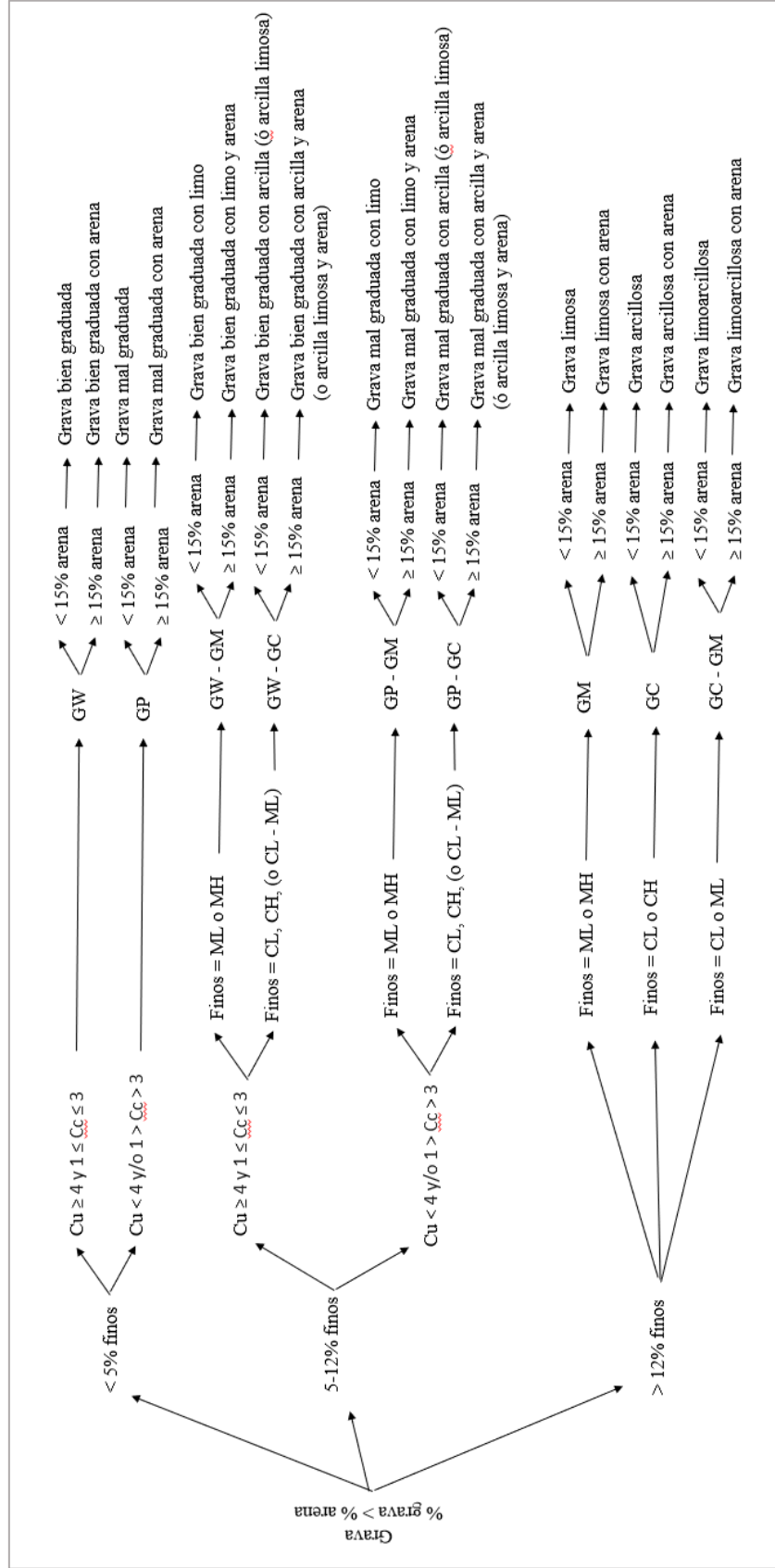
*Gráfico de plasticidad.*



Nota: Clasificación de suelos.

**Figura 5**

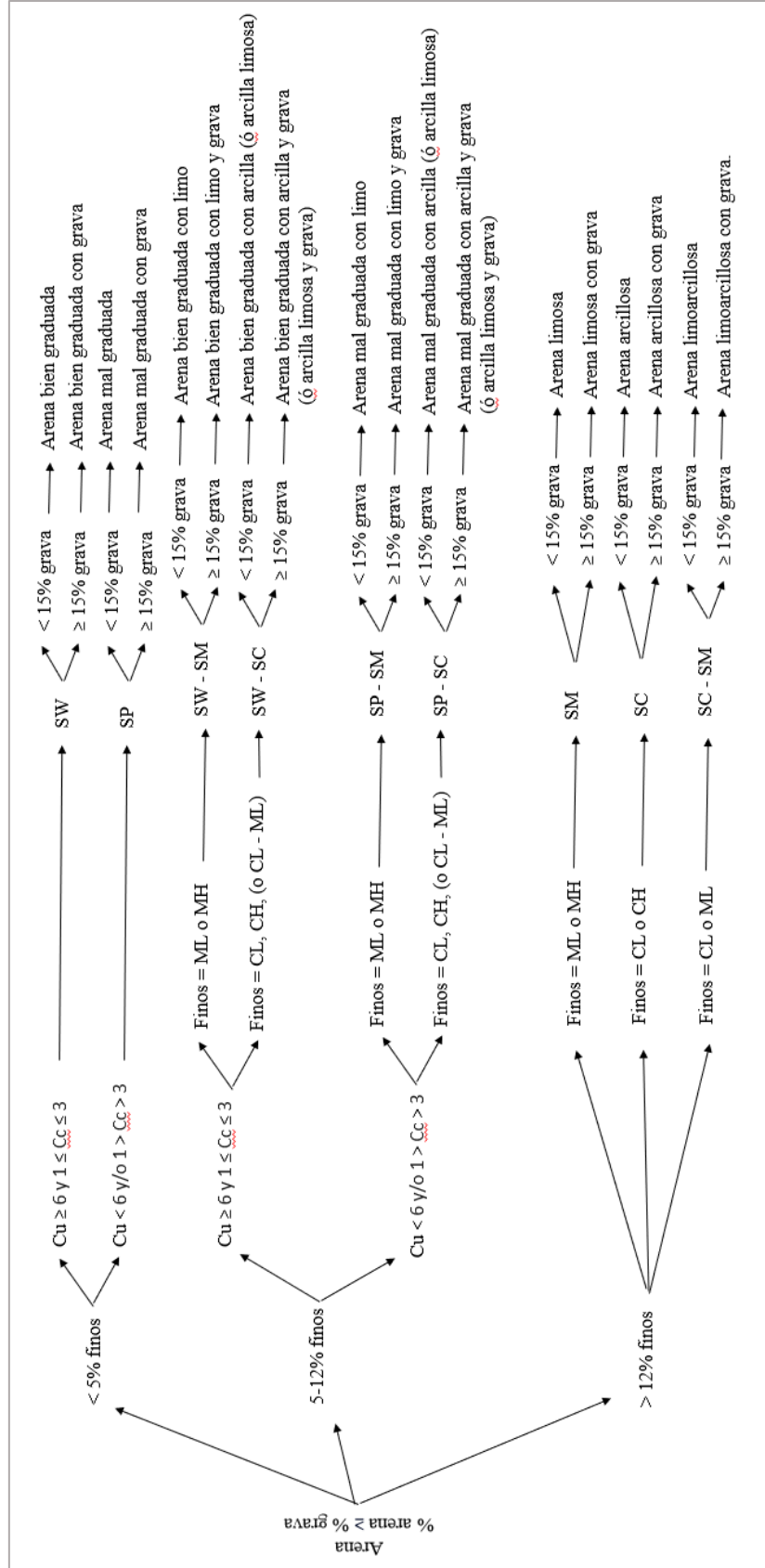
Diagrama para clasificación de suelo de granulometría gruesa (% grava > % arena).



Nota: Adoptado sistema estándar de categorización de suelos empleado en ingeniería, por la ASTM D2487 – 93.

**Figura 6**

Diagrama para clasificación de suelo de granulometría gruesa (% arena  $\geq$  % grava).



Nota: Basado en el sistema normativo de clasificación de suelos para ingeniería según la ASTM D2487-93.



### 2.2.11. Clasificación de suelos método AASHTO

En el libro de Das (2015) se argumenta que:

Iniciado en 1929 por la Administración de Carreteras, este sistema de clasificación fue actualizado por última vez en 1945 por la Comisión de Clasificación de Materiales para Subrasantes y Materiales Granulares, siguiendo las especificaciones (Norma ASTM D3282-93, 2004; método AASHTO M145).

La tabla 4 presenta el sistema de clasificación AASHTO actualmente en uso, que organiza los suelos en siete grupos principales: A-1 a A-7. Los grupos A-1, A-2 y A-3 corresponden a materiales granulares, con un máximo del 35% de partículas pasando por el tamiz núm. 200. Si más del 35% pasa a través de este tamiz, los suelos se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, siendo principalmente limo o arcilla. Este sistema utiliza los siguientes criterios para su clasificación:

- Dimensión de las partículas
- Nivel de plasticidad
- Si hay fragmentos rocosos como guijarros o piedras

(pp. 78-80)

**Tabla 4**

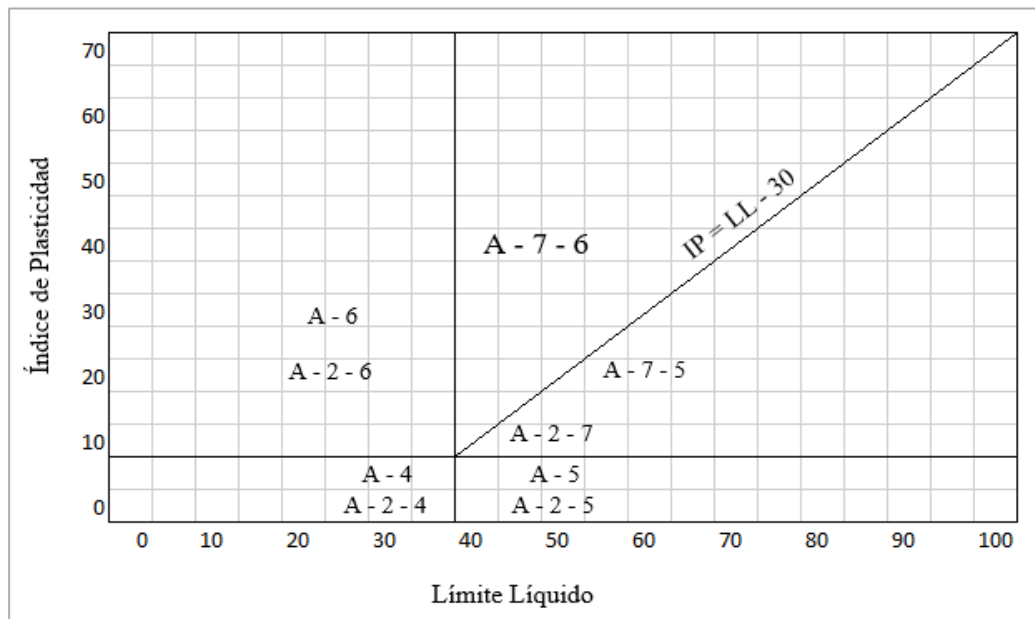
*Clasificación de suelos para suelos basada en AASHTO M 145 y/o ASTM D3282-93, 2004.*

<b>Clasificación General</b>	<b>Material granular en el cual no más del 35% de las partículas pasan por el tamiz de 0.075 mm (N° 200)</b>	<b>Materiales clasificados como finos, con un porcentaje mayor al 35% que atraviesa el tamiz de 0.075 mm (N° 200)</b>							
<b>Clasificación de grupo</b>	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-7-6	
	A-1-a	A-1-b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-7-5	A-7-6	
Análisis granulométrico % que pasa por el tamiz de:									
2 mm (N° 10)	máx. 50								
0.425 mm (N° 40)	máx. 30	máx. 50	máx. 51						
F: 0.075 mm (N° 200)	máx. 15	máx. 25	máx. 10	máx. 35					
Características de la fracción que pasa el 0.425 (N° 40)									
Características de la fracción que pasa el tamiz (N° 40)									
LL: Límite de Líquido									
IP: Índice de plasticidad	máx. 6	máx. 6	N.P.	máx. 40	mín. 41	máx. 40	mín. 41	máx. 40	mín. 41
Tipo de material	Piedras, gravas y arenas	Arenas Finas	Gravas y arenas limosas o arcillosas	Suelos limosos	Suelo arcilloso				
Estimación general del suelo como subrasante	Excelente a bueno			Regular a insuficiente					

Nota: Adoptada del manual de carreteras suelos geología, geotecnia y pavimentos sección suelos y pavimentos (p. 36), por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2014, Servicios Gráficos Squadrino EIRL.

## Figura 7

*Plasticidad aplicada en la clasificación.*



Nota: Destacando las áreas separadas que representan el tipo de suelo y el grupo, conforme a las características granulométricas y de consistencia, de acuerdo con la práctica estándar para clasificar suelos y mezclas de suelo-agregado, por la ASTM D3282 – 93, 2004.

De igual manera, esta técnica permite al usuario determinar cuán adecuado es el suelo como subrasante, mediante el índice de grupo:

$$\text{índice de grupo} = (F - 35) * [0.2 + 0.005 * (LL - 40)] + 0.01 * (F - 15) * (8PI - 10)$$

Donde:

F: porcentaje de suelo que pasa la malla N°200

LL: límite líquido

PI.: índice de plasticidad

Indica que valores próximos a cero son altamente deseables para un suelo de subrasante, y a medida que estos valores se alejan de cero, la calidad del suelo no es óptima (ASTM Internacional, ASTM D2487-93: Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS), 1993).



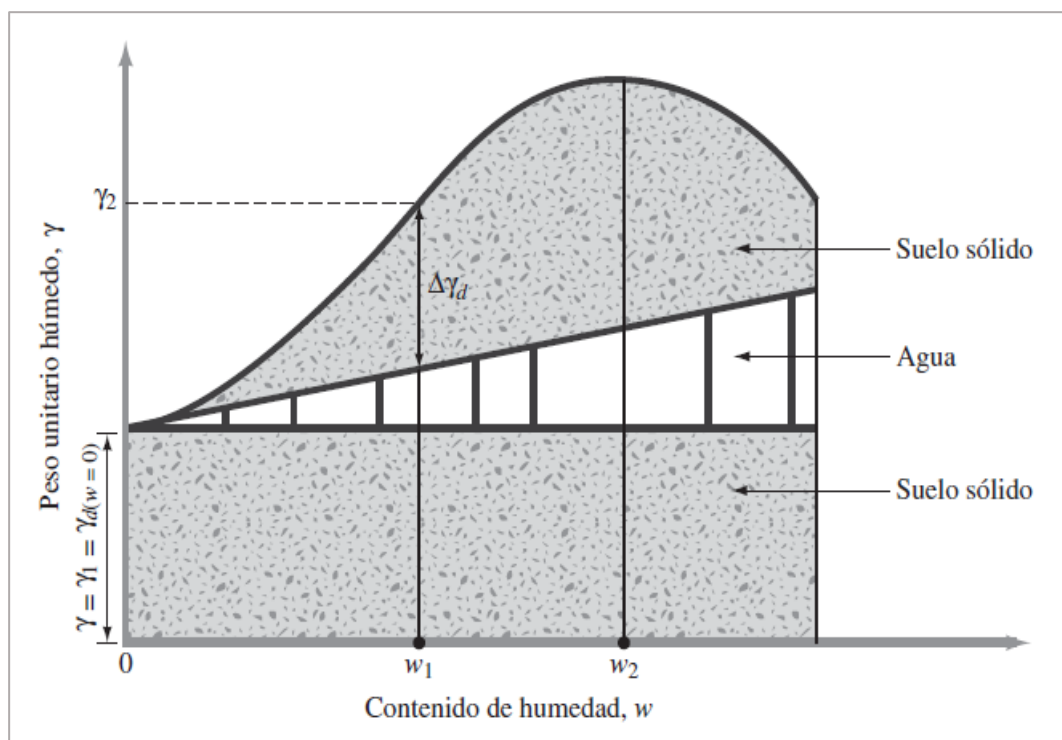
## 2.2.12. Compactación de los suelos

En palabras de Das (2015):

La compactación es un proceso que implica la eliminación de aire del suelo mediante la aplicación de energía mecánica. El grado de compactación se mide en función de la densidad seca del suelo. La adición de agua durante la compactación facilita el deslizamiento de las partículas del suelo. Con el aumento de la humedad, el peso unitario seco inicialmente crece, pero una vez superado un punto, el agua llena los espacios entre las partículas, lo que reduce la densidad, como se observa en la figura 8. (pp. 91-92)

**Figura 8**

*Principio de compactación.*



Nota: El aumento gradualmente de la cantidad de agua y el peso de los elementos sólidos.

En el laboratorio, se utiliza el ensayo de Proctor para determinar el punto de máxima densidad del suelo. Dependiendo de los requisitos específicos del



experimento, se elige entre el Proctor normal o modificado: el primero se emplea para suelos que soportarán cargas menores, mientras que el segundo se utiliza para suelos que soportarán cargas más pesadas (ASTM D1557-12, 2021).

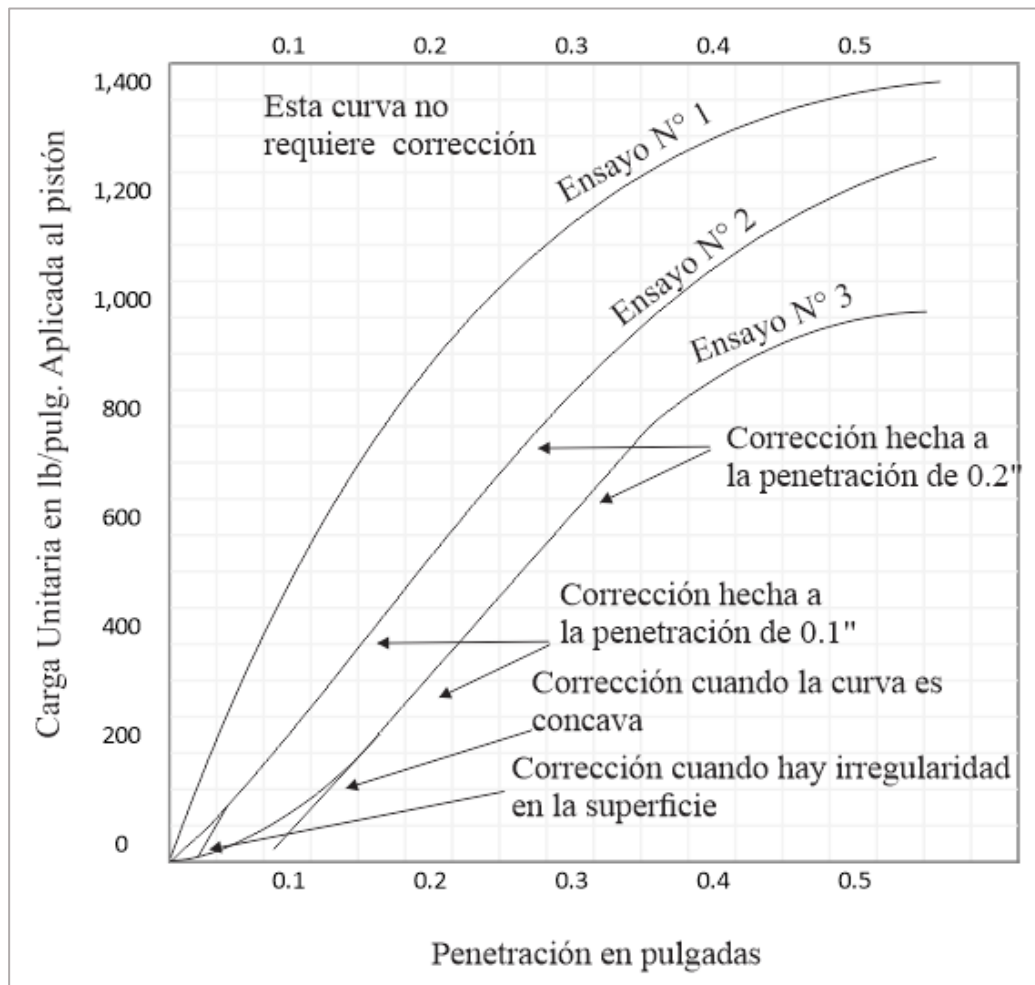
### **2.2.13. Ensayo CBR**

Según lo indicado por Porter (1938):

Este ensayo se lleva a cabo en las partículas del suelo, particularmente aquellas que pasan a través de la malla N°40. El procedimiento consiste en saturar el material con agua hasta alcanzar el contenido de humedad ideal y luego compactar la muestra en un molde cilíndrico de 6 pulgadas de diámetro. Posteriormente, se sumerge el espécimen en un tanque de agua y se mide su altura inicial. Durante la saturación, la muestra permanece en el molde, con un disco poroso y un peso de 10 libras, simulando el efecto de la sobrecarga sobre la subrasante con un espesor de pavimento de 4 a 5 pulgadas. Se le aplica una carga de 2000 lb por pulgada cuadrada. La muestra se evalúa para medir su resistencia, penetrando a una velocidad constante de 0,05 pulgadas por minuto mediante un pistón de 3 pulgadas cuadradas. Un dial, fijado al aparato, mide la penetración del pistón. Las cargas se registran para cada 0,1 pulgadas de penetración, hasta un total de 0,5 pulgadas. Este ensayo se realizó con un suelo de California, cuyos resultados se usan como referencia para su comparación con otros suelos, junto con la recomendación de Porter de utilizar otros suelos como parte del pavimento. (p. 324-327)

**Figura 9**

*Curva del suelo de California del ensayo de CBR.*



Nota: Destaca la conexión entre la penetración y el esfuerzo en suelos del área de California y diversas clases de suelos. Proveniente de “La preparación de subrasantes” (p. 327), por O. J. Porter, 1938.

#### **2.2.14. Permeabilidad de suelos**

Según lo indicado por Terzaghi y Peck (1963) expone que “un material es permeable cuando tiene vacíos interconectados, los cuales están presentes en todos los suelos, incluso en las arcillas más duras” (p. 45).



### **2.2.15. Conductividad hidráulica**

Según lo mencionado por Das (2015) dice que:

Varios elementos afectan la conductividad hidráulica de los suelos, entre ellos: el índice de fluidez del líquido, la disposición y el tamaño de las aberturas, la granulometría, la proporción de vacíos, la textura de las fracciones minerales y el grado de humedad.

### **2.2.16. Ensayo para caracterizar la transmisión de fluidos en laboratorio**

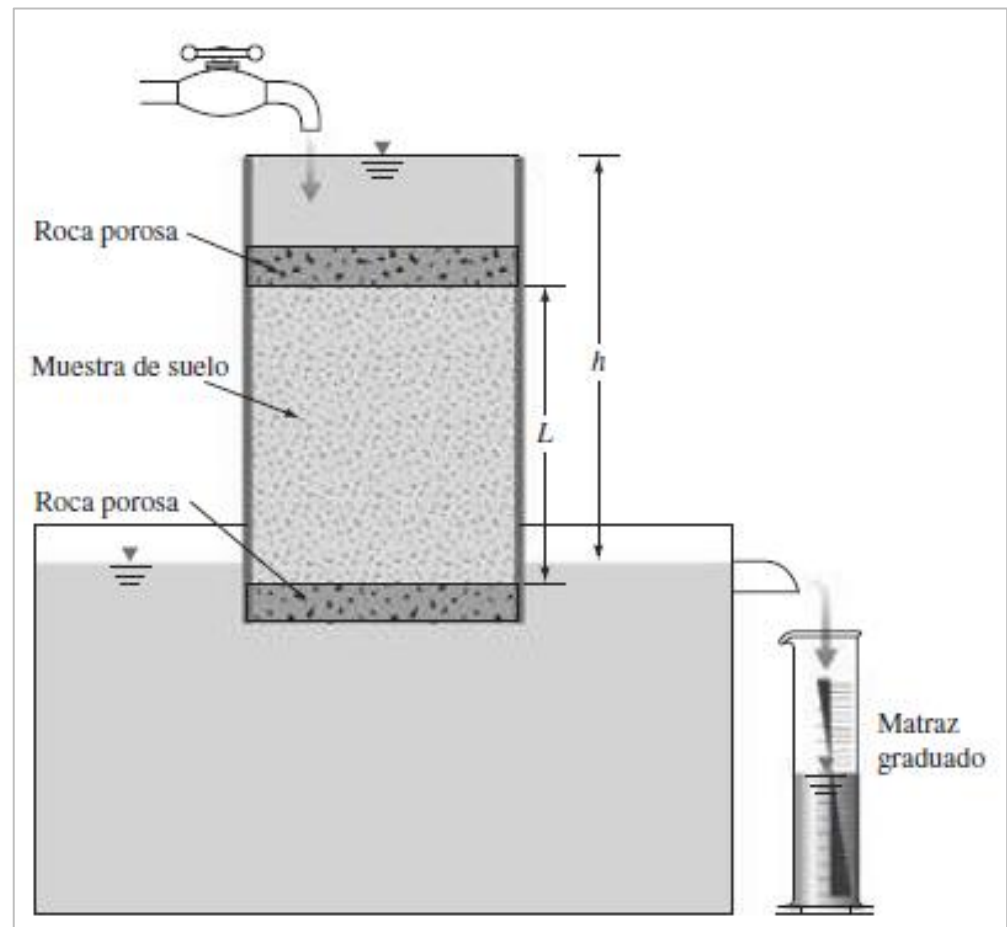
Con el fin de calcular la conductividad hidráulica del terreno, se emplean dos pruebas estándar: la prueba de carga constante y la prueba de caída de carga. La primera se usa sobre todo en suelos de grano grueso, mientras que para suelos de grano fino, las bajas velocidades de flujo llevan a optar por la prueba de caída de carga.

#### **2.2.16.1. Prueba de carga constante**

Se regula el flujo de agua hacia la entrada de manera que la variación de presión entre la entrada y salida permanezca constante durante el ensayo. Tras estabilizar la velocidad de flujo, el agua se recoge en un matraz medidor durante un período preestablecido.

**Figura 10**

*Prueba de permeabilidad de carga constante.*



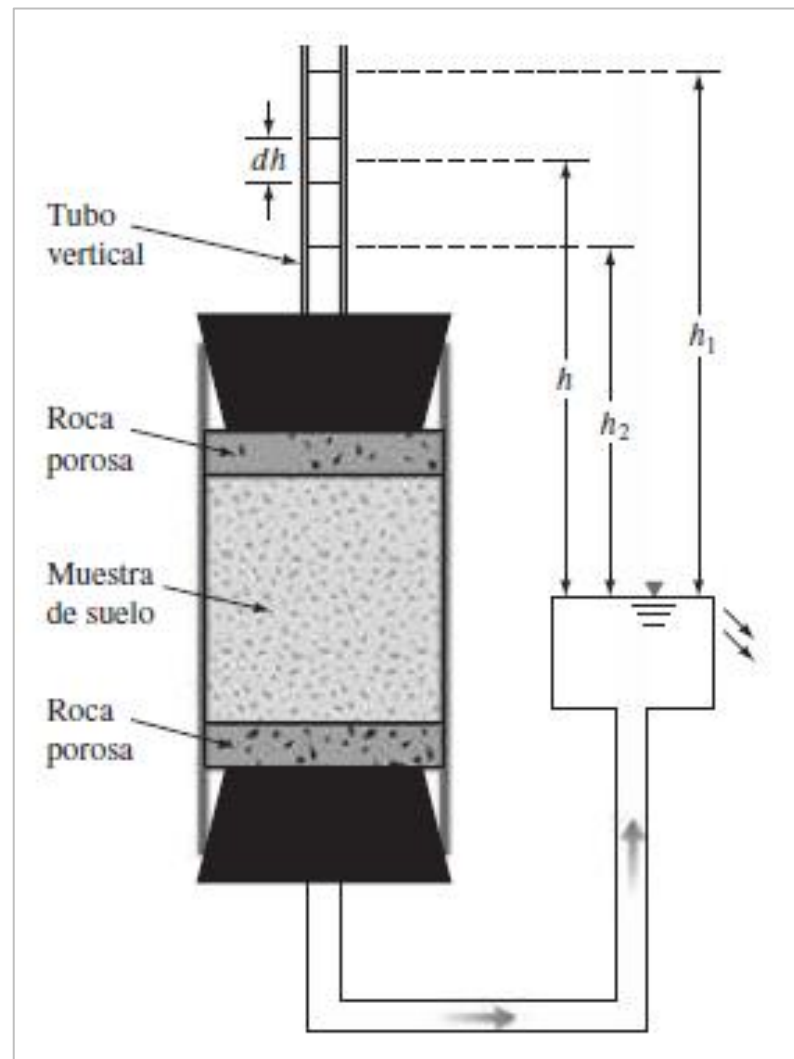
Nota: Figura 6.4 de B. M. Das (p. 123), 2015.

### 2.2.16.2. Prueba de caída de carga

Se presenta un esquema habitual de la prueba de permeabilidad de la caída de carga. El agua de un conducto vertical circula por el terreno. Se registra la variación inicial de carga,  $h_1$ , durante el tiempo  $t = 0$ , y se deja que el agua circule por la muestra de suelo de forma que la variación final de carga durante el tiempo  $t = t_2$  sea  $h_2$ . (pp. 121-124)

**Figura 11**

*Prueba de permeabilidad de caída de carga.*



Nota: Figura 6.5 de B. M. Das (p. 124), 2015.

**Tabla 5**

*Permeabilidad y condiciones de drenaje de los suelos.*

	10 <sup>-9</sup>	10	1.0	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>						
<b>Drenaje</b>	<b>Bueno</b>						<b>Pobre</b>						<b>Prácticamente impermeable</b>					
Tipo de suelo	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava						Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada						Suelos “impermeables”, es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición.					
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo “in situ” por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastantes exactos.																	
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia																	
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados						Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia						Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.					
Determinación indirecta de k	Por cálculo partiendo de la curva granulométrica. Solo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.																	
Determinación indirecta de k	Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita la mucha experiencia																	

Nota: Adoptada de Terzaghi y Peck tabla 11.1 (p. 53), 1963.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. METODOLOGÍA

##### 3.1.1. Tipo de investigación

Según Mejía et al. (2014) menciona que “la investigación conocida como pura, también llamada básica o sustantiva, se denomina de esta manera porque no persigue fines comerciales o económicos. Su impulso principal es la curiosidad intelectual y el entusiasmo por el descubrimiento de nuevas ideas y conocimientos” (p. 91).

Por lo tanto, este estudio se categoriza como una investigación pura, por que sirve como base para una investigación aplicada y esencial ya que es crucial para el progreso de la ciencia centrada en el método cuantitativo, ya que los resultados obtenidos serán expresados en términos numéricos que pueden ser medidos.

##### 3.1.2. Nivel de investigación

Conforme a lo señalado por Baptista et al. (2014) “su objetivo principal radica en proporcionar una explicación sobre las razones detrás de la ocurrencia de un fenómeno y las circunstancias en las cuales se manifiesta, o bien, en establecer la relación entre dos o más variables” (pp. 95-96).

El nivel de investigación es explicativo básico, ya que se intentaron identificar las causas y efectos de las variables que han sido asociados y comparados para evaluar el impacto del tiempo de tratamiento.





### 3.1.3. Diseño de investigación

Baptista et al. (2014) dicen que “En un diseño de investigación se fusionan las etapas teóricas del proceso, tal como el planteamiento del problema, el marco teórico y la formulación de hipótesis, estableciendo así una conexión con fases posteriores que son más operativas en su naturaleza” (p. 128).

Por lo tanto, la investigación adopta un diseño experimental, ya que la variable independiente (aditivo órganosilanos), en diversas concentraciones, desencadena los impactos y respuestas en la variable dependiente (estabilización de suelos arcillosos). El análisis se lleva a cabo a escala de laboratorio utilizando muestras de suelo extraídas a cielo abierto (calicatas) en la comunidad de Chingora. Las diferentes combinaciones de órganosilanos (Terrasil) a ser probadas en laboratorio son del  $0 \text{ l/m}^3$ ,  $0.5 \text{ l/m}^3$ ,  $1 \text{ l/m}^3$  y  $1.5 \text{ l/m}^3$  en cada muestra extraída. Las pruebas de análisis se realizaron en el área de suelos de la EPIC - UNAP.

### 3.1.4. Población

Baptista et al. (2014) nos indica que: “La población representa la colección intrínseca de estudio que están presentes en el área geográfica donde se realiza la investigación” (pp. 174-175).

Por ende, el grupo de estudio son los suelos que provienen de la salida a Cusco – Juliaca de la Comunidad de Chingora desde el Km 01 + 300 al 03 + 500 en un tramo de 2km para una calzada de 6.40 m.

**Tabla 6**

*Coordenadas UTM del inicio y final del tramo.*

Ubicación			Coordenadas (UTM)		
Ruta	Punto	Progresiva (km)	Este (m)	Norte (m)	Zona
Pista	Inicio	01+300	375296.81	8297462.29	19 L
	Fin	03+500	375295.49	8297462.35	

Nota: Tramo de pista y coordenadas UTM del tramo.

**Figura 12**

*Ubicación del tramo, km: 01+300 al km: 03+500.*



Nota: Se observa el inicio y fin del tramo. Tomado de Google Earth Pro.

### 3.1.5. Muestra

Baptista et al. (2013) señala que “una muestra es una parte de la población seleccionada por diferentes métodos, garantizando que sea representativa del conjunto completo al reflejar sus características” (p. 175).

Para este estudio, la muestra corresponde al material arcilloso obtenido de tres calicatas excavadas entre 1.00 y 1.50 metros de profundidad.

**Tabla 7**

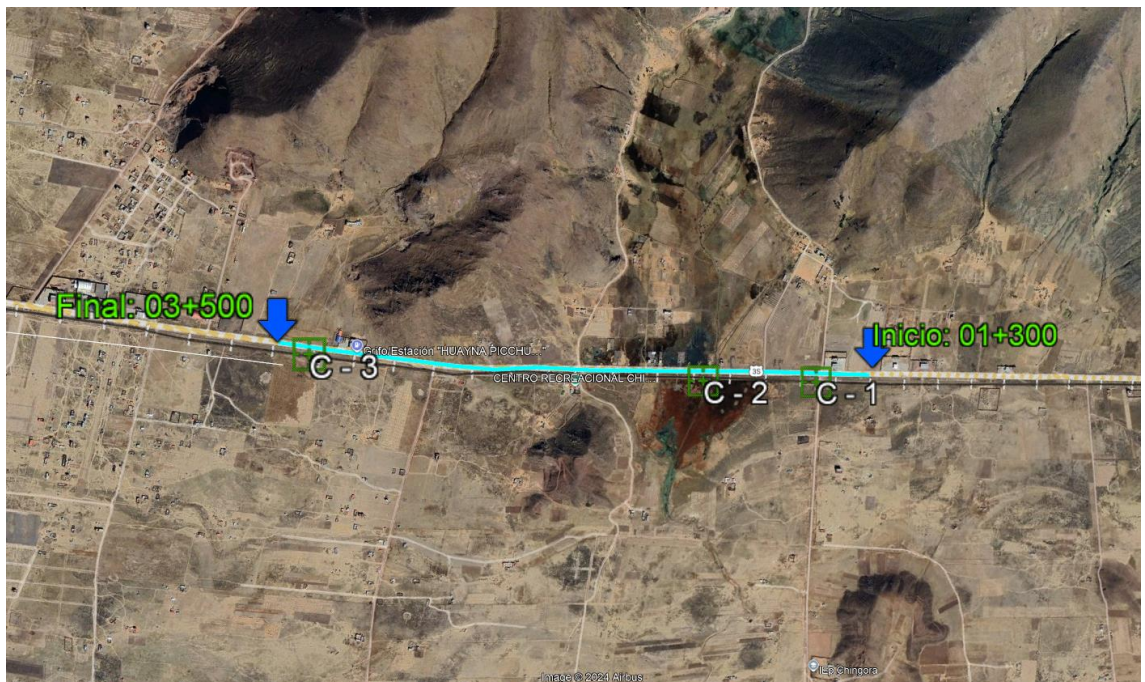
*Cantidad de puntos de análisis del tramo.*

Ruta	Punto	Ubicación		Coordenadas (UTM)		
		Prog. inicial	Prog. final	Este (m)	Norte (m)	Zona
Pista	C-1	01+300	01+800	375345.98	8299104.18	19 L
	C-2	01+800	02+300	375560.26	8298690.87	
	C-3	03+000	03+500	376175.48	8297320.22	

Nota: Tramo de pista y coordenadas UTM del tramo.

**Figura 13**

*Ubicación de los puntos: C-1, C-2, C-3.*



Nota: Google Earth Pro.

### 3.1.5.1. Método de muestreo

De acuerdo con Baptista et al. (2014) destaca que “el muestreo es una técnica fundamental en la investigación científica que determina qué parte de la población debe estudiarse para obtener resultados relevantes sobre el conjunto total” (pp. 175-176).



Con el fin de recolectar muestras de suelo, se realizaron tres calicatas abiertas, seleccionadas discrecionalmente por el investigador. El proceso comenzó con una revisión del área de estudio y consideró la accesibilidad, la estratigrafía, la detección de zonas críticas y la obtención del material de manera no perjudicial para la comunidad local.

### **3.1.6. Recolección de datos**

El método primordial para la recopilación y estudio de la información consiste en el monitoreo y el estudio de documentos a través de recolección de datos en formato digital creados en plantillas y la anotación manual en el cuaderno de campo. Más adelante, en la etapa estadística del análisis de datos, se llevan a cabo los cálculos requeridos.

### **3.1.7. Operacionalización de variables**

Mejía et al. (2013) menciona que “el proceso consiste en un razonamiento lógico que comienza con la transformación de variables teóricas en intermedias, para luego convertir estas en variables empíricas o indicadores y, posteriormente, construir los índices” (p. 191).

De acuerdo con la formulación de los problemas, los objetivos y las hipótesis de este estudio, se identifican dos variables, una como independiente y la otra como dependiente, cada una con su correspondiente operacionalización, como se muestra en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Operacionalización de variables.*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADOR	ESCALA
VD* Estabilización de suelos arcillosos	La estabilización de suelos arcillosos se refiere al proceso mediante el cual se mejoran las características físicas y mecánicas de estos suelos con el fin de aumentar su capacidad portante, reducir la expansión y mejorar la permeabilidad. Este proceso es fundamental en el ámbito de la construcción de infraestructuras, ya que los suelos arcillosos pueden presentar problemas como asentamientos, deslizamientos y fallas estructurales.	La estabilización de suelos arcillosos se evaluará a través de pruebas, tales como el ensayo de CBR, el ensayo de permeabilidad y definir los límites de plasticidad. Se medirán los parámetros como la capacidad portante, la expansión, la permeabilidad, la densidad seca y el índice de plasticidad. Los resultados se analizarán mediante comparaciones estadísticas entre las muestras tratadas y las no tratadas.	Propiedades mecánicas del suelo	Capacidad portante Expansión Permeabilidad Densidad seca máxima	Razón % Razón cm/s Razón g/cm <sup>3</sup>
VI* Aditivo Órganosilano	El aditivo órganosilano es una sustancia química líquida que se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos durante la construcción. Se aplica con el objetivo de aumentar la resistencia, estabilidad y capacidad de carga del suelo, así como para reducir la expansión y contracción causadas por cambios en la humedad.	El aditivo órganosilano se aplicará en diferentes dosificaciones durante el proceso de estabilización. Su efectividad se evaluará mediante la comparación de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso estabilizado con diversas concentraciones del aditivo. Se analizará la relación entre la cantidad de aditivo aplicado y los resultados de estabilización con el fin de determinar la dosis óptima que produzca el mayor efecto positivo.	Propiedades físicas del suelo Dosificación	Contenido de humedad Índice de plasticidad	Razón % Razón % Razón l/m <sup>3</sup>

Nota: \*VD es la Variable Dependiente, \*VI es la Variable Independiente

## 3.2. MATERIALES

### 3.2.1. Ubicación Geográfica

El material se obtiene de la comunidad de Chingora, perteneciente al distrito de San Miguel, provincia de San Román y región de Puno. El estudio realizado es del Km 01 + 300 al 03 + 500 de la Pista de salida Juliaca – Cusco.

**Tabla 9**

*Coordenadas UTM de los puntos.*

Muestra	Coordenadas (UTM*)		
	Este (m)	Norte (m)	Zona
C-1	375345.98	8299104.18	
C-2	375560.26	8298690.87	19 L
C-3	376175.48	8297320.22	

Nota: \*UTM es Universal Transversal de Mercator.

**Figura 14**

*Extracción de material, C – 1.*



Nota: Se observa la calicata 1 (C-1) y la toma de muestra

### Figura 15

*Extracción de material, C – 2.*



Nota: Se observa la calicata 2 (C-2) y la toma de muestra

### Figura 16

*Extracción de material, C – 3.*



Nota: Se observa la calicata 3 (C-3) y la toma de muestra

### 3.2.2. Suelo de Consistencia Blanda

La unidad de prueba tomada de suelo de textura poco firme empleada en este estudio se obtuvo de una excavación realizada en un tramo de 2 km de la comunidad de Chingora, a una profundidad de 1.0 a 1.5 metros aproximadamente. Las propiedades geotécnicas de las calicatas C-1, C-2 y C-3 extraídas son las siguientes:

**Tabla 10**

*Propiedades del suelo natural de la calicata 1 (C-1).*

<b>Propiedades</b>	<b>Valores</b>
Contenido de Humedad natural (%)	7.63
Límites de consistencia	
Límite Líquido LL (%)	31.67
Límite Plástico LP (%)	19.15
Índice de Plasticidad, IP (%)	12.51
Proctor Modificado	
Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.884
Contenido de humedad óptimo, CHO (%)	13
Valor Relativo de Soporte	
CBR (%)	3.10
Expansión (%)	5.10
Permeabilidad (cm/s)	2.981E-04

Nota: Elaboración propia.



**Tabla 11***Propiedades del suelo natural de la calicata 2 (C-2).*

<b>Propiedades</b>	<b>Valores</b>
Contenido de Humedad natural (%)	5.25
Límites de consistencia	
Límite Líquido LL (%)	63.54
Límite Plástico LP (%)	28.77
Índice de Plasticidad, IP (%)	34.77
Proctor Modificado	
Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.536
Contenido de humedad óptimo, CHO (%)	23
Valor Relativo de Soporte	
CBR (%)	4.10
Expansión (%)	4.11
Permeabilidad (cm/s)	1.116E-04

Nota: Elaboración propia.

**Tabla 12***Propiedades del suelo natural de la calicata 3 (C-3).*

<b>Propiedades</b>	<b>Valores</b>
Contenido de Humedad natural (%)	4.33
Límites de consistencia	
Límite Líquido LL (%)	55.70
Límite Plástico LP (%)	28.39
Índice de Plasticidad, IP (%)	27.31
Proctor Modificado	
Máxima densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.797
Contenido de humedad óptimo, CHO (%)	16
Valor Relativo de Soporte	
CBR (%)	3.60
Expansión (%)	4.52
Permeabilidad (cm/s)	1.028E-04

Nota: Elaboración propia.

### 3.2.3. Aditivo químico Órganosilanos

Órganosilanos es un aditivo para suelos que se utiliza en nanotecnología, es soluble en agua y mejora la capacidad de carga del suelo. A continuación, se detallan las características de este aditivo:

**Tabla 13**

*Características del aditivo órganosilanos.*

Características	Descripción
Forma	Líquida
Color	Rojizo pálido
Punto de inflamación	>90°C (recipiente cerrado)
Punto de ebullición	200°C
Propiedades explosivas	No explosivo
Densidad	1.04 g/ml
Viscosidad (25 C)	100 – 500 cps

Nota: Elaboración propia.

## 3.3. ORIGEN DEL MATERIAL EMPLEADO

### 3.3.1. Muestreo del suelo

La muestra objeto del estudio se recolectó de una excavación situada de un tramo de 2 km de la carretera que conecta Cusco - Juliaca.

### 3.3.2. Aditivo químico Órganosilanos

El compuesto químico órganosilanos empleado en este estudio fue suministrado por la empresa Brem Environmental Solutions S.A.C., distribuidor oficial del producto en el territorio peruano. La sede de la empresa se localiza en

Lima, específicamente en la Av. Parque de las Leyendas N° 210, Oficina 802,  
Urb. Pando-San Miguel.

### 3.4. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO NATURAL

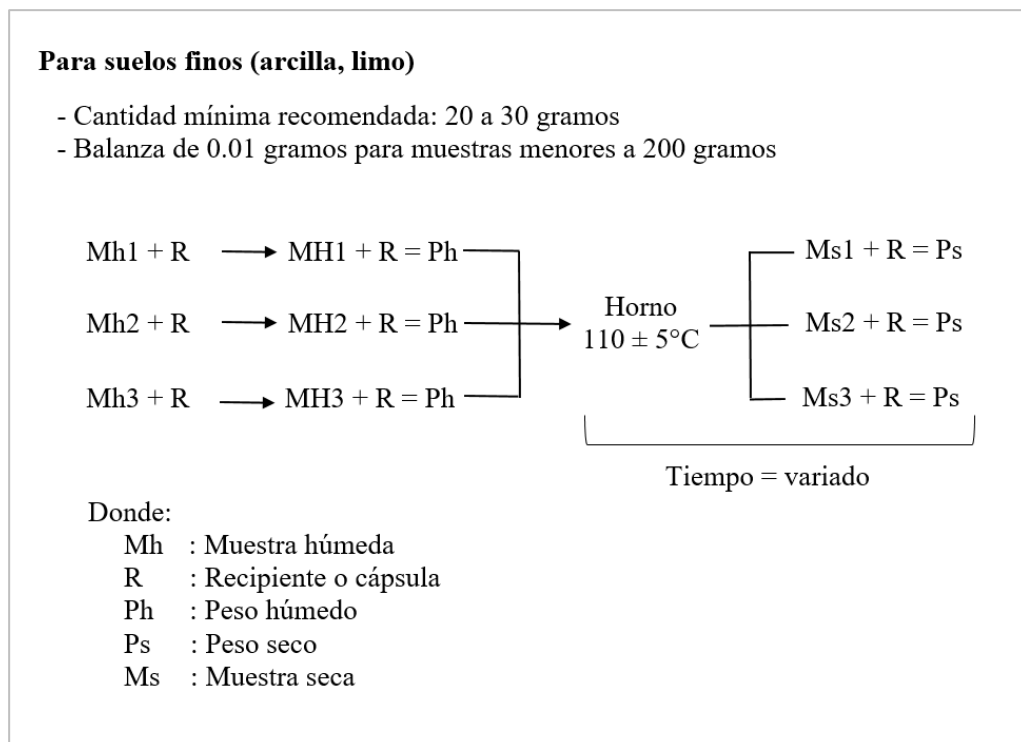
Para evaluar las características del suelo bajo investigación, se llevaron a cabo los  
ensayos siguientes:

#### 3.4.1. Humedad Natural

Según el MTC (2014) el ensayo “MTC E 108, que mide la humedad  
natural del suelo, permitirá su comparación con la humedad óptima obtenida en  
los ensayos Proctor, necesarios para calcular el CBR del suelo mediante el ensayo  
MTC E 132” (p. 35).

#### Figura 17

*Flujograma del procedimiento de contenido de humedad.*



Nota: Elaboración propia



Contenido de Humedad Natural – Calicata 1 (C-1): 7.63%

Contenido de Humedad Natural – Calicata 2 (C-2): 5.25%

Contenido de Humedad Natural – Calicata 3 (C-3): 4.33%

### **3.4.2. Límite Líquido**

Según el Manual de Ensayo de Materiales (2016) “el contenido de humedad se designa, de forma arbitraria, como aquel en el que el surco entre dos mitades de una pasta de suelo se cierra 13 mm tras 25 caídas de la copa desde 1 cm de altura” (p. 67).

Utilizamos el método del multipunto. Se utilizó una muestra seca pasante la malla número 40, obteniendo 200 gramos. Luego, el material fue combinado con agua en un contenedor de porcelana hasta obtener una masa suave y espesa, luego lo tapamos el recipiente por un periodo de 24 horas para que el material se uniformice, colocando el recipiente dentro de una caja de tecnopor. Después de este tiempo, se transfirió el material al aparato de Cuchara Casagrande, llenando aproximadamente un tercio de su capacidad total. Se extendió y distribuyó uniformemente el material utilizando una espátula para formar una pasta circular con una profundidad de 1 cm. Se hizo una ranura firme en el centro de la muestra de suelo en la cuchara con un acanalador. La manivela se giró a una velocidad de 1.9 a 2.1 golpes/segundo para calcular la cantidad de impactos requeridos para unir las paredes de la ranura a la base, y de esta manera obtener la humedad de la muestra.

a) Calicata C-1, suelo natural

**Tabla 14**

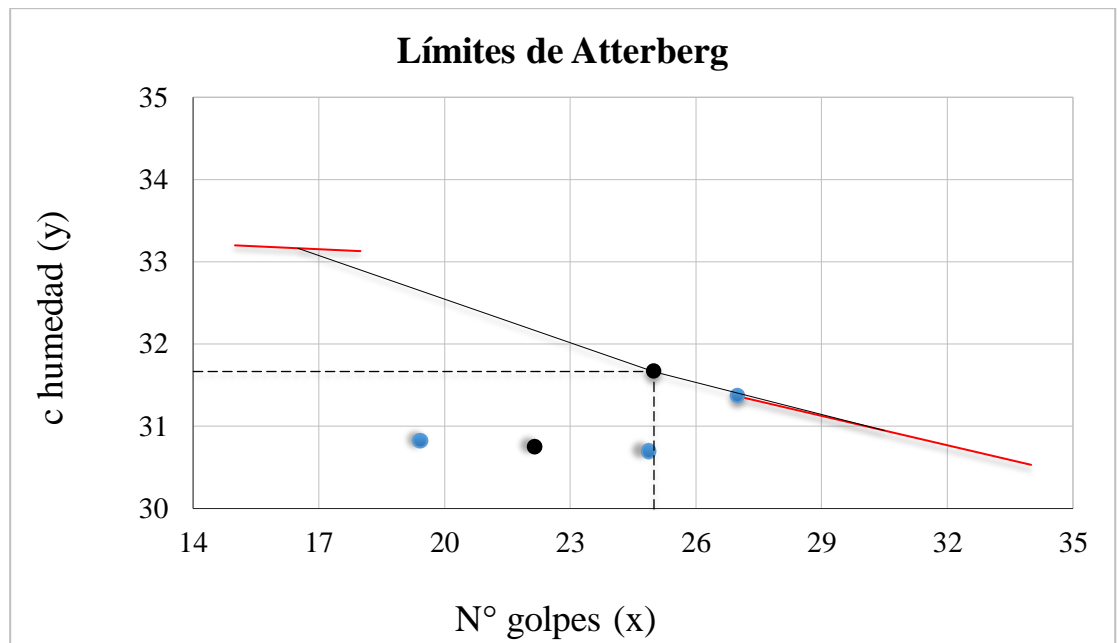
*Límite líquido C-1, suelo natural.*

Descripción	Und.	1	2	3	4
Código de cápsula		CH - 8	CH - 2	CH - 11	M - 105
Número de golpes	N°	15	18	27	34
Peso de cápsula	g	24.98	25.11	23.13	30.89
Peso de cápsula + suelo húmedo	g	54.83	51.19	47.84	66.76
Peso de cápsula + suelo seco	g	47.39	44.70	41.94	58.37
Peso de suelo seco	g	22.41	19.59	18.81	27.48
Peso del agua	g	7.44	6.49	5.90	8.39
Humedad	%	33.20	33.13	31.37	30.53
<b>Límite Líquido (%)</b>		<b>31.67</b>			

Nota: Elaboración propia

**Figura 18**

*N° de golpes vs contenido de humedad.*



Nota: A mayor cantidad de golpes la humedad baja

**b) Calicata C-2, suelo natural**

**Tabla 15**

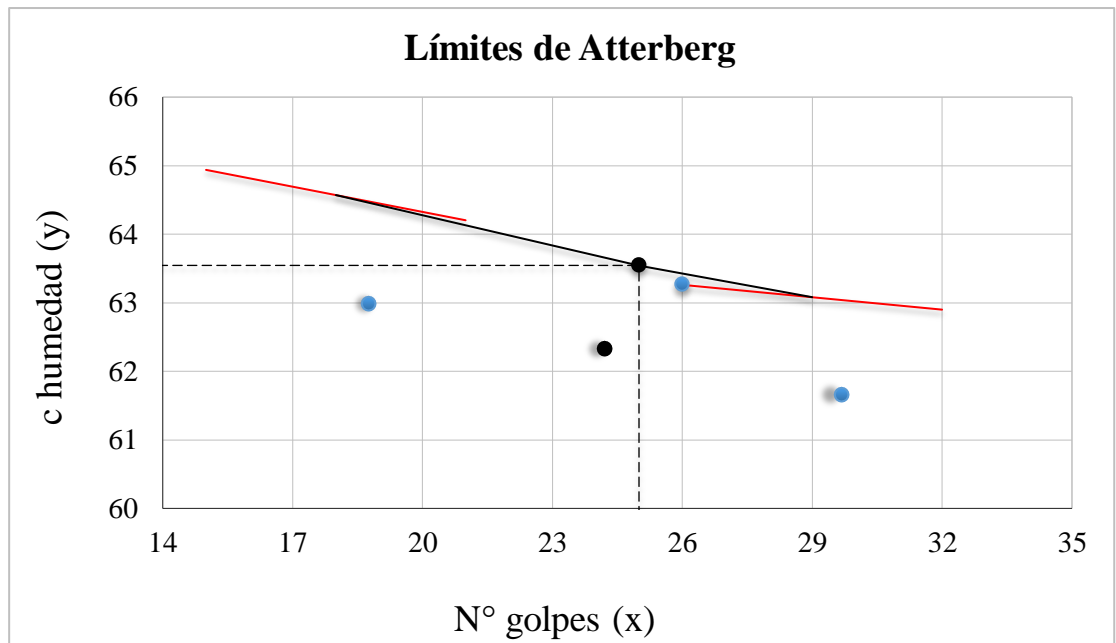
*Límite líquido C-2, suelo natural.*

Descripción	Und.	1	2	3	4
Código de cápsula		S - 100	T - 03	K - 3	S - 12
Número de golpes	Nº	15	21	26	32
Peso de cápsula	g	25.66	25.01	24.21	19.10
Peso de cápsula + suelo húmedo	g	44.43	50.33	38.12	38.99
Peso de cápsula + suelo seco	g	37.04	40.43	32.73	31.31
Peso de suelo seco	g	11.38	15.42	8.52	12.21
Peso del agua	g	7.39	9.90	5.39	7.68
Humedad	%	64.94	64.20	63.26	62.90
<b>Límite Líquido (%)</b>		<b>63.54</b>			

Nota: Elaboración propia

**Figura 19**

*Nº de golpes vs contenido de humedad.*



Nota: A mayor cantidad de golpes la humedad baja

c) Calicata C-3, suelo natural

Tabla 16

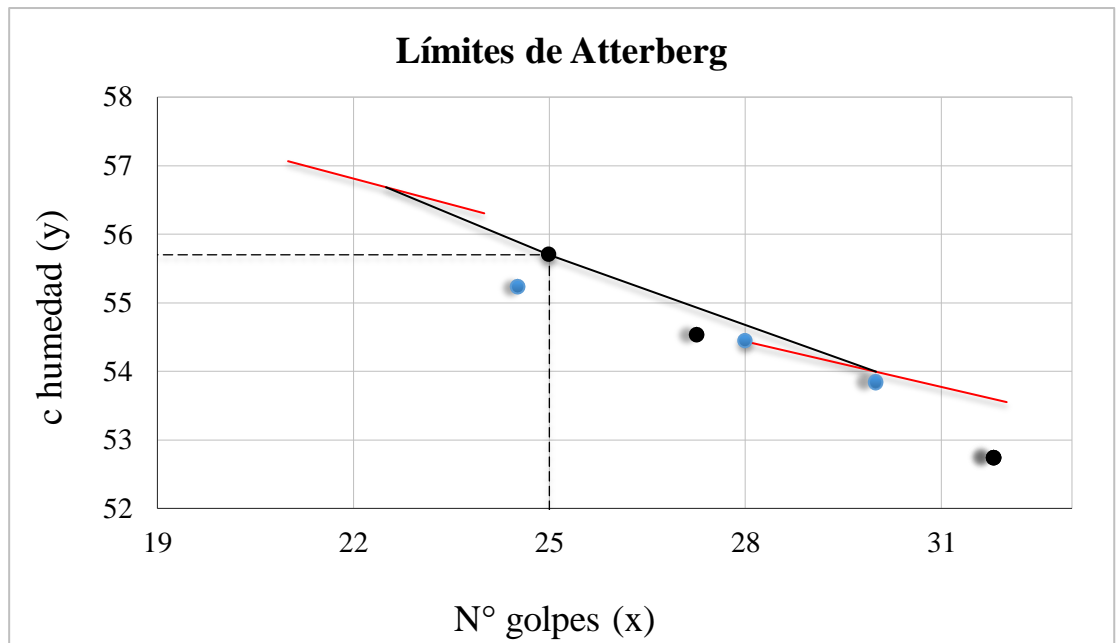
Límite líquido C-3, suelo natural.

Descripción	Und.	1	2	3	4
Código de cápsula		T - 10	T - 06	CH-1.2	CH-1.0
Número de golpes	Nº	21	24	28	32
Peso de cápsula	g	24.38	24.46	25.35	24.64
Peso de cápsula + suelo húmedo	g	53.17	49.75	51.79	48.21
Peso de cápsula + suelo seco	g	42.71	40.64	42.47	39.99
Peso de suelo seco	g	18.33	16.18	17.12	15.35
Peso del agua	g	10.46	9.11	9.32	8.22
Humedad	%	57.06	56.30	54.44	53.55
<b>Límite Líquido (%)</b>			<b>55.70</b>		

Nota: Elaboración propia

Figura 20

Nº de golpes vs contenido de humedad.



Nota: A mayor cantidad de golpes la humedad baja



### 3.4.3. Límite Plástico

Se utilizó una muestra pasante por la malla N° 40, obteniendo 25 gramos. Luego, se mezcló en un recipiente con agua destilada hasta obtener una masa suave y espesa, y se tapó el recipiente por un período de 24 horas para que el material se uniformice. Después, se toma entre 1.5-2 gramos, la cual se rueda con los dedos encima de la superficie lisa hasta que se desmorone al alcanzar un diámetro de 3.2 mm hasta obtener 6 gramos. Se repite una a dos veces el ensayo.

#### a) Calicata C-1, suelo natural

**Tabla 17**

*Límite plástico.*

Descripción	Und.	1	2	3
Código de cápsula		S -T8	T - 06	S - 28
Peso de cápsula	g	23.88	24.44	19.44
Peso de cápsula + suelo húmedo	g	30.18	30.56	25.62
Peso de cápsula + suelo seco	g	29.14	29.59	24.64
Peso de suelo seco	g	5.26	5.15	5.20
Peso del agua	g	1.04	0.97	0.98
Humedad	%	19.77	18.83	18.85
<b>Límite Plástico (%)</b>			<b>19.15</b>	

Nota. Elaboración propia

Finalmente, el índice de plasticidad es 12.51%





## b) Calicata C-2, suelo natural

**Tabla 18**

*Límite plástico.*

Descripción	Und.	1	2	3
Código de cápsula		S - 57	S - 58	S - 59
Peso de cápsula	g	17.86	17.44	18.27
Peso de cápsula + suelo húmedo	g	25.29	24.13	25.76
Peso de cápsula + suelo seco	g	23.63	22.65	24.07
Peso de suelo seco	g	5.77	5.21	5.80
Peso del agua	g	1.66	1.48	1.69
Humedad	%	28.77	28.41	29.14
<b>Límite Plástico (%)</b>			<b>28.77</b>	

Nota: Elaboración propia

Finalmente, el índice de plasticidad es 34.77%

## c) Calicata C-3, suelo natural

**Tabla 19**

*Límite plástico.*

Descripción	Und.	1	2	3
Código de cápsula		S -28	S - 32	S - 41
Peso de cápsula	g	19.48	21.65	18.07
Peso de cápsula + suelo húmedo	g	27.42	27.57	24.68
Peso de cápsula + suelo seco	g	25.65	26.27	23.22
Peso de suelo seco	g	6.17	4.62	5.15
Peso del agua	g	1.77	1.30	1.46
Humedad	%	28.69	28.14	28.35
<b>Límite Plástico (%)</b>			<b>28.39</b>	

Nota: Elaboración propia

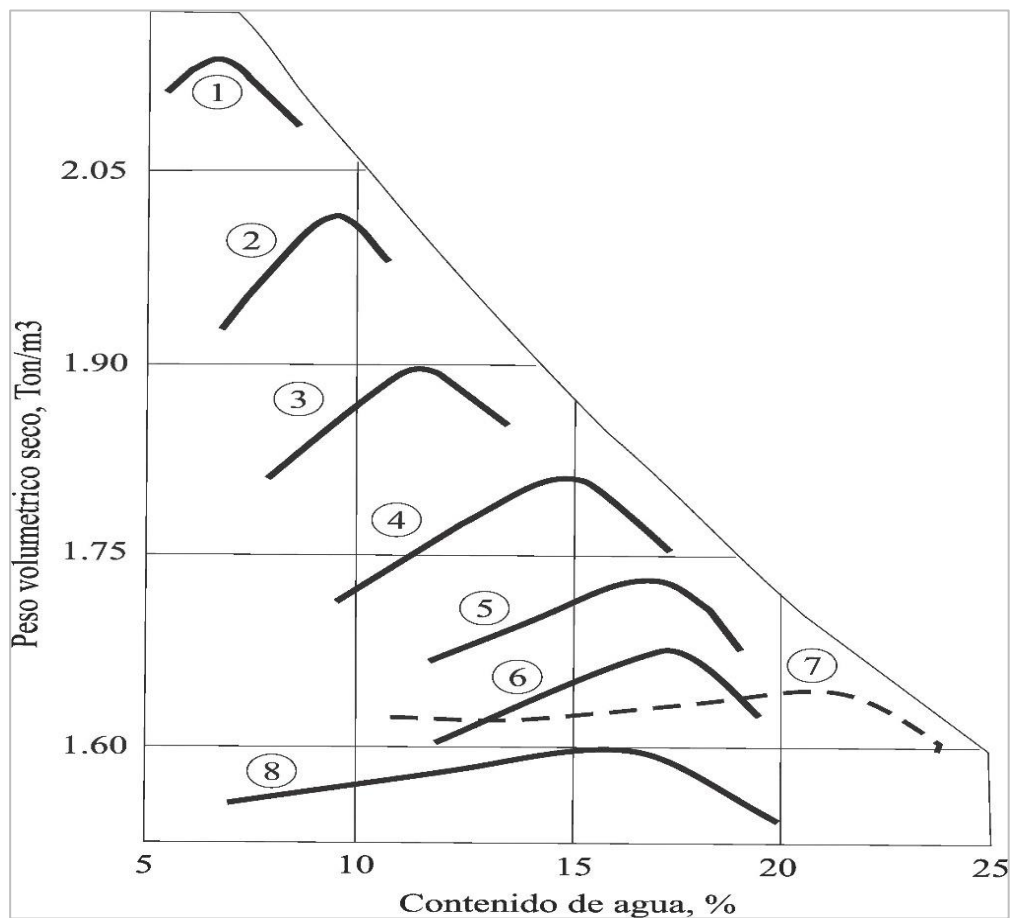
Finalmente, el índice de plasticidad es 27.31%

### 3.4.4. Proctor Modificado

Se uso el método A. Se utilizó la muestra que pasa el tamiz N° 4, obteniendo 2.5 kg de material por cada punto. En función al límite líquido y al índice de plasticidad tomamos la gráfica de compactación que usaremos tomando como referencia el gráfico de Rico Castillo. Luego se mezcló el material en un recipiente de porcelana con agua en la proporción indicada, luego lo guardamos en una bolsa hermética por un periodo de 24 horas para que el material se homogenice. Después de este tiempo se empezó a compactar en forma circular en 5 capas de 25 golpes por capa en un molde de 4" con un pisón de 4.54 kg.

**Figura 21**

*Compactación de suelos cohesivos y no cohesivos.*



Nota: Rico Castillo (2000, como se citó en Patricia Sangüés) influencia de la compactación en las propiedades físicas, figura 4.

**Tabla 20***Tipos de suelo.*

Descripción	Arena %	Limo %	Arcilla %	LL	IP
Arena bien graduada	88	88	88	16	
Marga arenosa bien graduada	72	72	72	16	
Marga arenosa de graduación media	73	73	73	22	4
Arcilla limo arenosa	32	32	32	28	9
Arcilla limosa	5	5	5	36	15
Limo de loess	5	5	5	26	2
Arcilla homogénea	6	6	6	67	40
Arena mal graduada	94	94	94		

Nota: Rico Castillo (2000, como se citó en Patricia Sangüés, Influencia de la compactación en las propiedades físicas, figura 4).

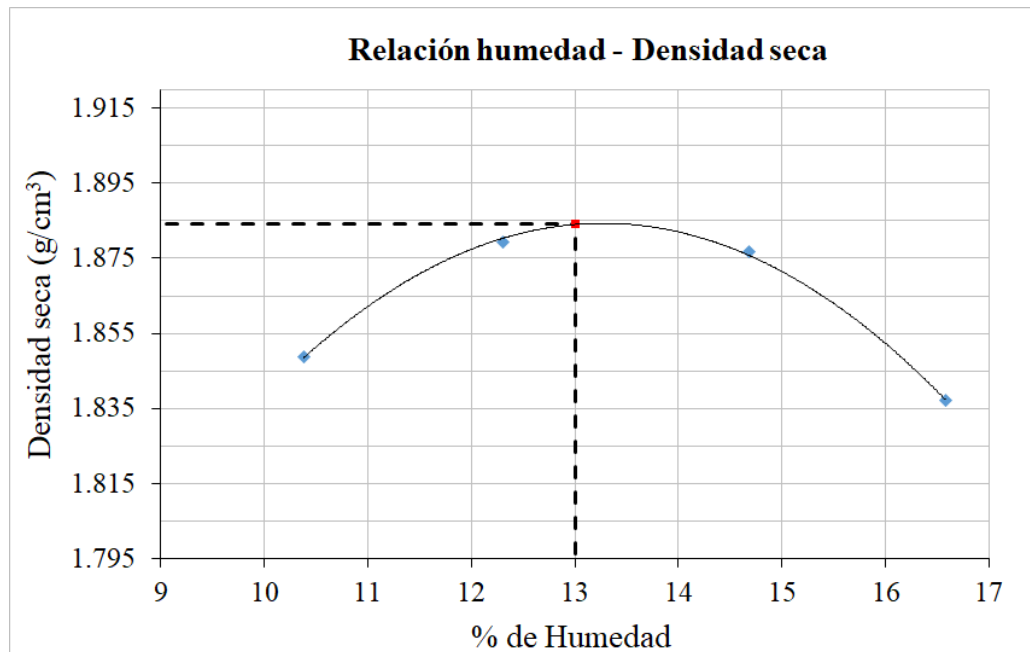
**a) Calicata C-1, suelo natural****Tabla 21***Proctor modificado C-1, suelo natural.*

N° de Ensayos	1	2	3	4
Humedad (%)	10.38	12.31	14.68	16.58
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.849	1.879	1.877	1.837

Nota: Elaboración propia

**Figura 22**

*Gráfica a escala natural de contenido de humedad vs densidad seca.*



Nota: Elaboración propia

Interpolando la ecuación de la gráfica se tiene:

$$\text{Densidad máxima seca} = 1.884 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Contenido de humedad óptimo} = 13 \%$$

**b) Calicata C-2, suelo natural**

**Tabla 22**

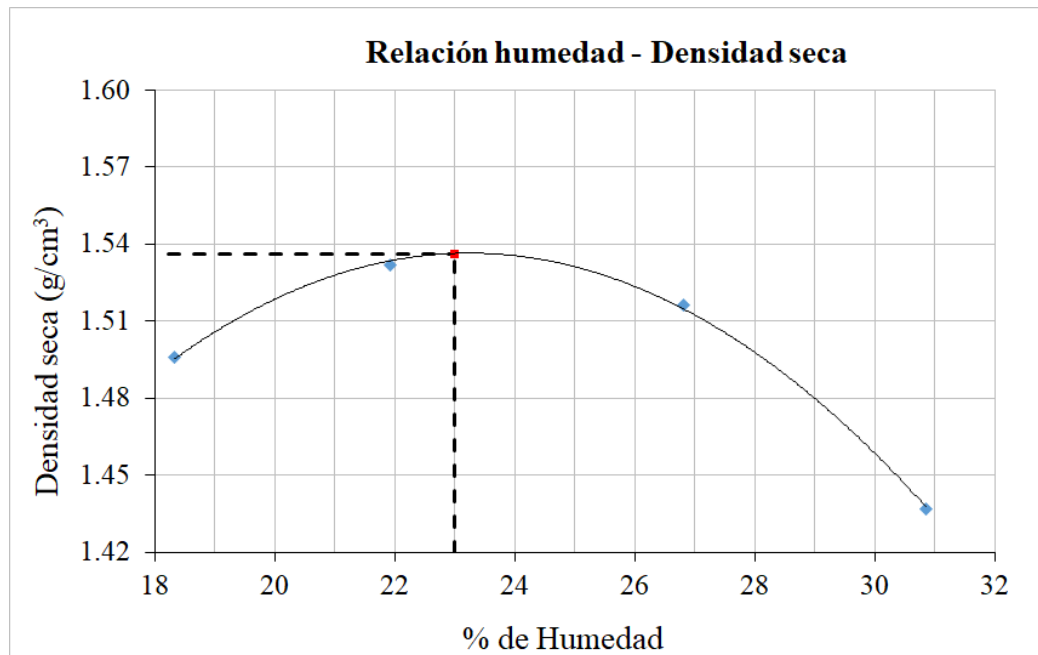
*Proctor modificado C-2, suelo natural.*

N° de Ensayos	E-1	E-2	E-3	E-4
Humedad (%)	18.34	21.93	26.81	30.85
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.496	1.532	1.516	1.437

Nota: Elaboración propia

**Figura 23**

*Gráfica a escala natural de contenido de humedad vs densidad seca.*



Nota: Elaboración propia

Interpolando la ecuación de la gráfica se tiene:

Densidad máxima seca =  $1.536 \text{ g/cm}^3$

Contenido de humedad óptimo = 23 %

**c) Calicata C-3, suelo natural**

**Tabla 23**

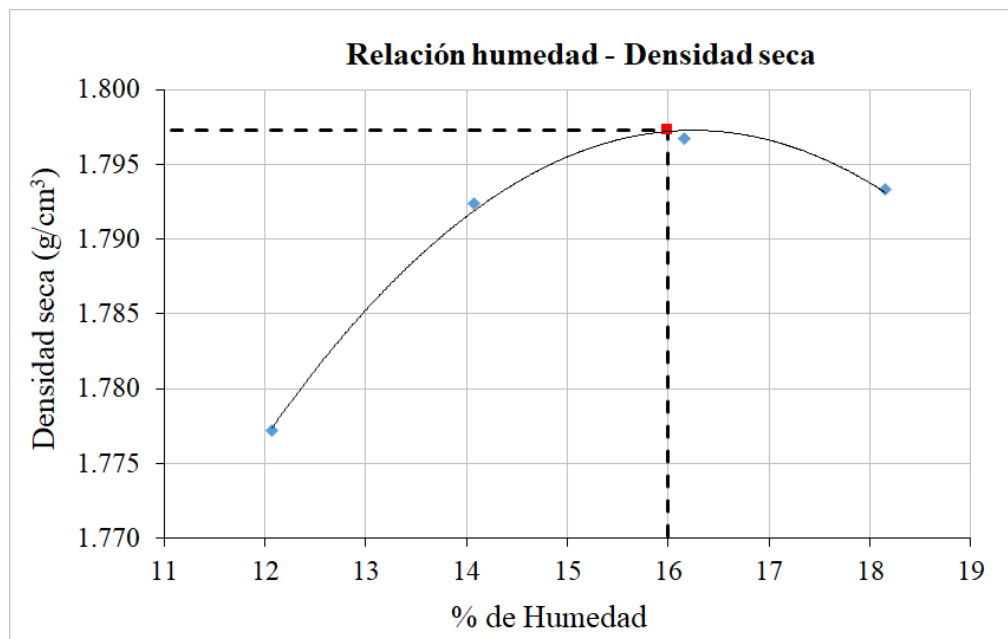
*Proctor modificado C-3, suelo natural.*

N° de Ensayos	E1	E2	E3	E4
Humedad (%)	12.07	14.07	16.16	18.15
Densidad seca ( $\text{g/cm}^3$ )	1.777	1.792	1.797	1.793

Nota: Elaboración propia

**Figura 24**

*Gráfica a escala natural de contenido de humedad vs densidad seca.*



Nota: Elaboración propia

Interpolando la ecuación de la gráfica se tiene:

$$\text{Densidad máxima seca} = 1.797 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Contenido de humedad óptimo} = 16 \%$$

### 3.4.5. Valor Relativo De Soporte (CBR)

Determinado el nivel de humedad ideal a través del ensayo Proctor Modificado, se mide la humedad natural del suelo. Luego, se añade agua para alcanzar la humedad fijada en una muestra de 6 kg, que se coloca en una bolsa hermética por 24 horas para homogenizar. Pasado este tiempo, se toma una muestra representativa para medir la humedad. Posteriormente, se pesa el molde de CBR de 6" con su base, se colocan el collar, el disco espaciador, y un papel filtro de igual diámetro del molde.

Una vez preparado el molde, se compacta en 5 capas con 56, 26 y 12 golpes por capa, con el objetivo de desarrollar una familia de curvas que muestran la relación entre la densidad, la humedad y la capacidad de carga. Después de compactar, se retira el collar y se enrasa. Luego, se desmonta el molde, se retira el disco espaciador, se coloca un papel filtro entre el molde y la base, y se pesa. A continuación, se coloca una sobrecarga no menor a 4.54 kg sobre la muestra, se realiza la primera lectura para medir la expansión y se sumerge durante 4 días en agua con un nivel constante, realizando una última lectura en el último día.

Pasados los 4 días, se saca el molde, se retira la sobrecarga, y se deja escurrir el agua durante 15 minutos en su posición normal. Transcurridos los 15 minutos, se pesa el molde sin la sobrecarga. Luego, se procede al ensayo de penetración colocando nuevamente la sobrecarga; con una prensa manual, se controla el deformímetro y un cronómetro. Finalmente, se desmonta el molde y se toma una muestra de la parte superior en contacto para determinar la humedad.

#### a) Calicata C-1, suelo natural

**Tabla 24**

*Expansión del suelo natural.*

Tiempo	12 golpes			26 golpes			56 golpes		
	Lectura	Expansión		Lectura	Expansión		Lectura	Expansión	
		mm	%		mm	%		mm	%
0 h	11.260	0.00	0.00	15.520	0.00	0.00	2.589	0.00	0.00
24 h	14.603	3.34	2.87	18.540	3.02	2.60	4.975	2.39	2.06
48 h	16.612	5.35	4.60	19.910	4.39	3.78	6.361	3.77	3.26
72 h	18.621	7.36	6.32	21.270	5.75	4.95	7.247	4.66	4.03
96 h	19.711	8.45	7.26	22.730	7.21	6.21	8.491	5.90	5.10

Nota: Elaboración propia

**Tabla 25**

*Penetración de CBR C-1, suelo natural.*

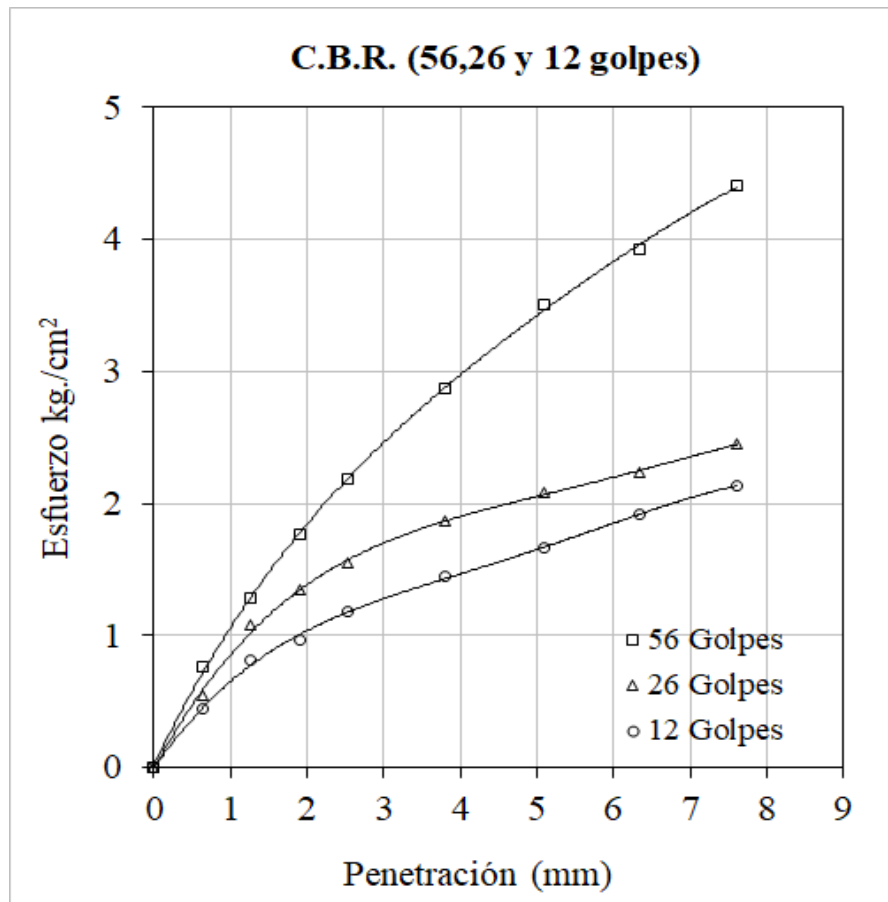
Penetración	12 golpes				26 golpes				56 golpes																	
	Lectura		Carga		Corrección		Lectura		Carga		Corrección		Lectura		Carga		Corrección									
	mm	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %						
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
0.63	0.08	8.55	0.44	0.10	10.59	0.55		0.14	14.66	0.76			0.24	24.85	1.29		0.33	34.02	1.77			0.41	42.16	2.19	3.10	
1.27	0.15	15.68	0.81	0.20	20.77	1.08		0.25	25.87	1.34			0.29	29.94	1.55	2.20	0.54	55.41	2.88			0.66	67.63	3.51	3.30	
1.91	0.18	18.74	0.97	0.25	25.87	1.34		0.35	36.05	1.87			0.39	40.13	2.08	2.00	0.74	75.78	3.93			0.83	84.94	4.41		
2.54	0.22	22.81	1.18	0.29	29.94	1.55	1.70	0.42	43.18	2.24			0.46	47.26	2.45											
3.81	0.27	27.90	1.45	0.35	36.05	1.87		0.46	47.26	2.45																
5.09	0.31	31.98	1.66	0.39	40.13	2.08	1.60	0.46	47.26	2.45																
6.35	0.36	37.07	1.92	0.42	43.18	2.24		0.46	47.26	2.45																
7.62	0.40	41.15	2.14	0.46	47.26	2.45		0.46	47.26	2.45																

Nota: Elaboración propia.



**Figura 25**

*Gráfico de CBR C-1, suelo natural.*



Nota: Elaboración propia.

**b) Calicata C-2, suelo natural**

**Tabla 26**

*Expansión del suelo natural.*

Tiempo	12 golpes			26 golpes			56 golpes		
	Lectura	Expansión		Lectura	Expansión		Lectura	Expansión	
		mm	%		mm	%		mm	%
0 h	0.00	0.00	0.00	1.123	0.00	0.00	8.652	0.00	0.00
24 h	4.561	4.56	3.92	3.510	2.39	2.05	10.010	1.36	1.17
48 h	6.793	6.79	5.83	5.896	4.77	4.11	12.730	2.72	2.34
72 h	9.002	9.00	7.73	8.282	7.16	6.16	12.730	4.08	3.51
96 h	19.711	10.34	8.88	9.950	8.83	7.60	13.431	4.78	4.11

Nota: Diseño personal

**Tabla 27**

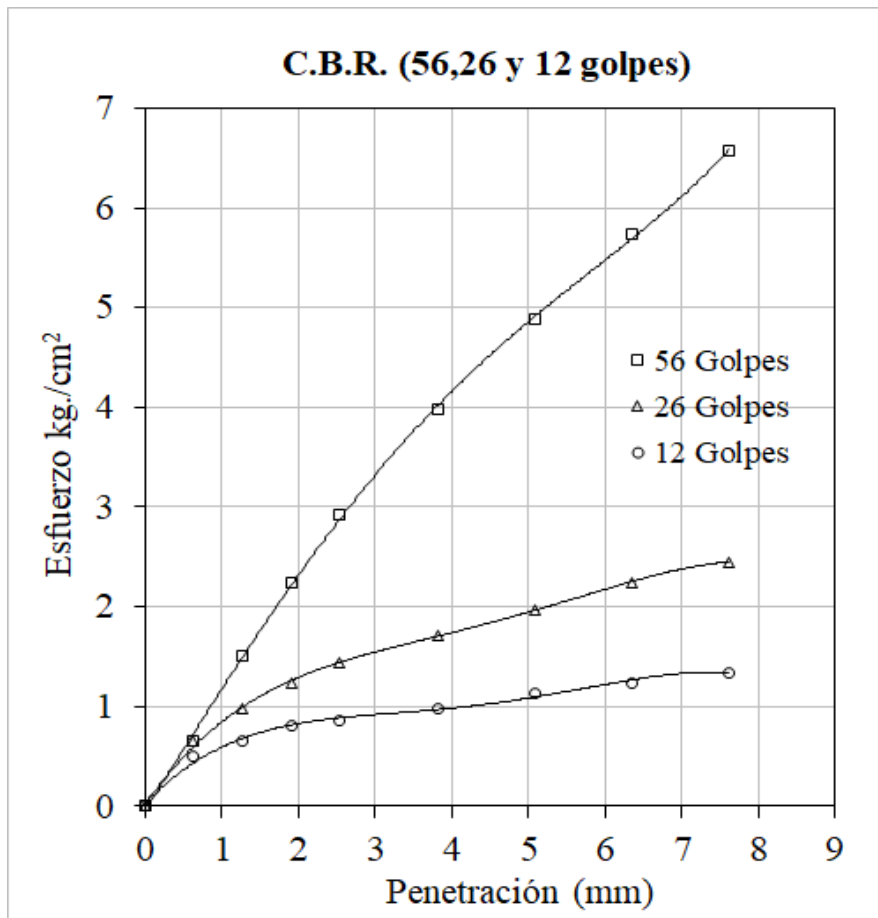
*Penetración de CBR C-2, suelo natural.*

Penetración	12 golpes						26 golpes						56 golpes					
	Lectura		Carga		Corrección		Lectura		Carga		Corrección		Lectura		Carga		Corrección	
	mm	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.63	0.09	9.57	0.50		0.12	12.62	0.66		0.12	12.62	0.66		0.12	12.62	0.66		0.12	
1.27	0.12	12.62	0.66		0.18	18.74	0.97		0.23	23.83	1.24		0.28	28.92	1.50		0.28	
1.91	0.15	15.68	0.81		0.27	27.90	1.45	1.30	0.32	33.00	1.71		0.42	43.18	2.24		0.42	
2.54	0.16	16.70	0.87		0.37	38.09	1.98	1.00	0.42	43.18	2.24		0.55	56.42	2.93		0.55	
3.81	0.18	18.74	0.97		0.46	47.26	2.45		0.75	76.80	3.99		0.75	76.80	3.99		0.75	
5.09	0.21	21.79	1.13		0.92	94.11	4.88		1.08	110.41	5.73		0.92	94.11	4.88		0.92	
6.35	0.23	23.83	1.24		1.24	126.70	6.58		1.24	126.70	6.58		1.24	126.70	6.58		1.24	
7.62	0.25	25.87	1.34															

Nota: Elaboración propia.

**Figura 26**

Gráfico de CBR C-2, suelo natural.



Nota: Elaboración propia.

**c) Calicata C-3, suelo natural**

**Tabla 28**

Expansión del suelo natural.

Tiempo	12 golpes			26 golpes			56 golpes		
	Lectura	Expansión		Lectura	Expansión		Lectura	Expansión	
		mm	%		mm	%		mm	%
0 h	9.264	0.00	0.00	15.841	0.00	0.00	0.121	0.00	0.00
24 h	14.603	5.34	4.59	18.543	2.70	2.33	1.726	1.61	1.37
48 h	15.725	6.46	5.55	19.916	4.08	3.51	3.331	3.21	2.75
72 h	16.612	7.35	6.31	21.284	5.44	4.68	4.936	4.82	4.12
96 h	17.631	8.37	7.19	22.730	6.89	5.93	5.403	5.28	4.52

Nota: Elaboración propia

**Tabla 29**

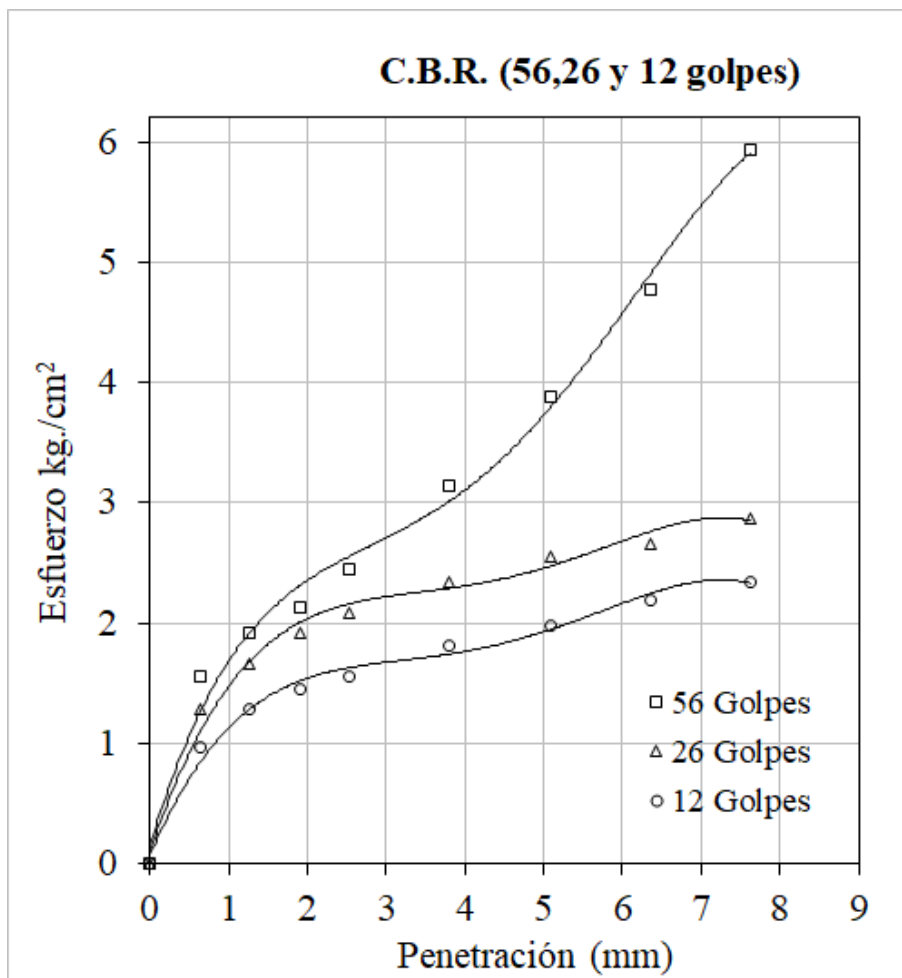
*Penetración de CBR C-3, suelo natural.*

		12 golpes				26 golpes				56 golpes									
Penetración		Lectura		Carga		Corrección		Lectura		Carga		Corrección		Lectura		Carga		Corrección	
mm	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %	KN	kg	kg/cm <sup>2</sup>	CBR %
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.63	0.18	18.74	0.97	0.24	24.85	1.29		0.29	29.94	1.55		0.36	37.07	1.92		0.40	41.15	2.14	
1.27	0.24	24.85	1.29	0.31	31.98	1.66		0.39	40.13	2.08	3.10	0.46	47.26	2.45	3.60	0.59	60.50	3.14	
1.91	0.27	27.90	1.45	0.36	37.07	1.92		0.48	49.29	2.56	2.30	0.73	74.76	3.88		0.90	92.07	4.78	
2.54	0.29	29.94	1.55	0.44	45.22	2.35		0.54	55.41	2.88	1.90	1.12	114.48	5.94					
3.81	0.34	35.03	1.82	0.48	49.29	2.56													
5.09	0.37	38.09	1.98	0.50	51.33	2.66													
6.35	0.41	42.16	2.19	0.54	55.41	2.88													
7.62	0.44	45.22	2.35																

Nota: Elaboración propia.

**Figura 27**

*Gráfico de CBR C-3, suelo natural.*



Nota: Elaboración propia.

### 3.4.6. Permeabilidad

Para suelos finos realizaremos el tipo de permeámetro de carga variable, teniendo en cuenta un molde cilíndrico de altura de 25 cm y una muestra de suelo de altura de 11.5 cm compactada donde colocamos un material granular, arena y geotextil tanto en la parte superior e inferior del molde para regular el flujo de agua considerando que es un flujo laminar. Como hablamos de pequeños volúmenes de agua que pasen por el medio permeable generando una carga hidráulica de presión de 5 psi.

a) **Calicata C-1, suelo natural.**

**Tabla 30**

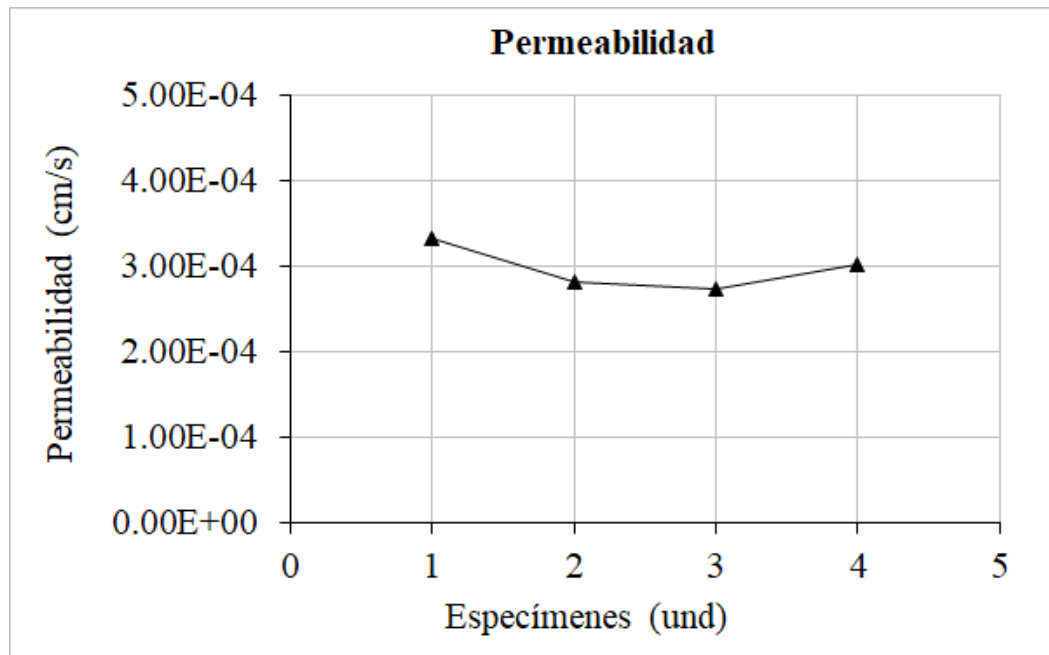
*Permeabilidad de C-1.*

N° de ensayo	1	2	3	4
Presión (mca)	3.52	3.52	3.52	3.52
t (segundos)	1620	1920	1980	1800
T(°C)	14.72	14.82	14.53	14.45
k (cm/s)	2.921E-04	2.465E-04	2.390E-04	2.629E-04
Correc. $n_t/n_{20}$	1.143	1.140	1.149	1.152
$k_{20}$ (cm/s)	3.339E-04	2.810E-04	2.746E-04	3.028E-04

Nota: Elaboración propia

**Figura 28**

*Ensayos realizados vs permeabilidad.*



Nota: Elaboración propia

**b) Calicata C-2, suelo natural.**

**Tabla 31**

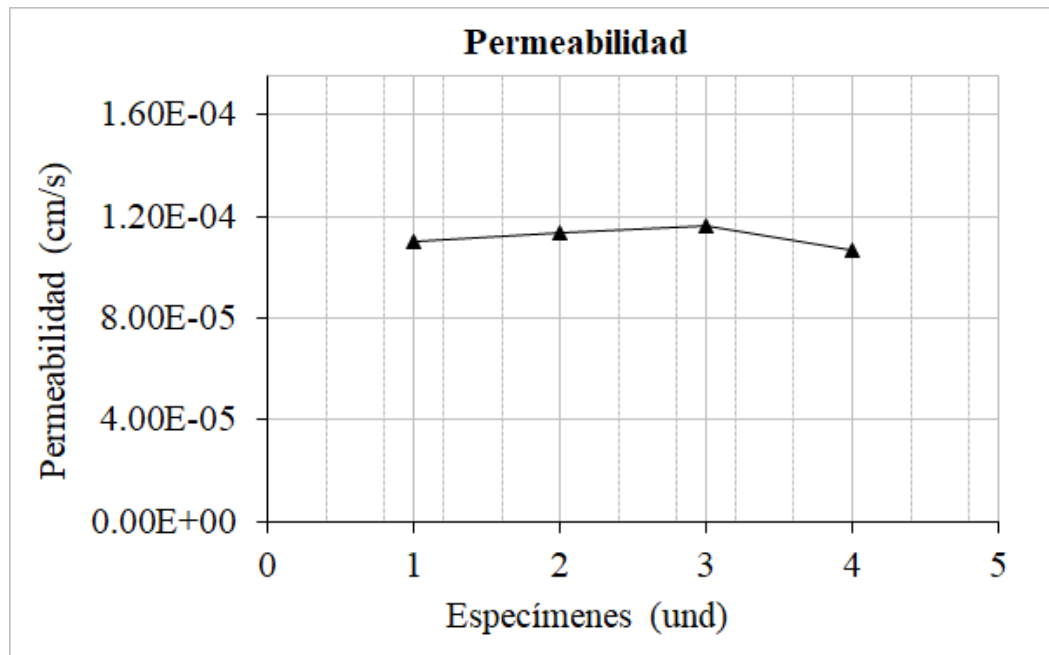
*Permeabilidad de C-2.*

N° de ensayo	1	2	3	4
Presión (mca)	3.52	3.52	3.52	3.52
t (segundos)	4560	4440	4320	4680
T(°C)	17.54	17.41	17.64	17.96
k (cm/s)	1.038E-04	1.066E-04	1.095E-04	1.011E-04
Correc. $n_t/n_{20}$	1.063	1.066	1.060	1.052
$k_{20}$ (cm/s)	1.103E-04	1.136E-04	1.161E-04	1.064E-04

Nota: Elaboración propia

**Figura 29**

*Ensayos realizados vs permeabilidad.*



Nota: Elaboración propia

**c) Calicata C-3, suelo natural.**

**Tabla 32**

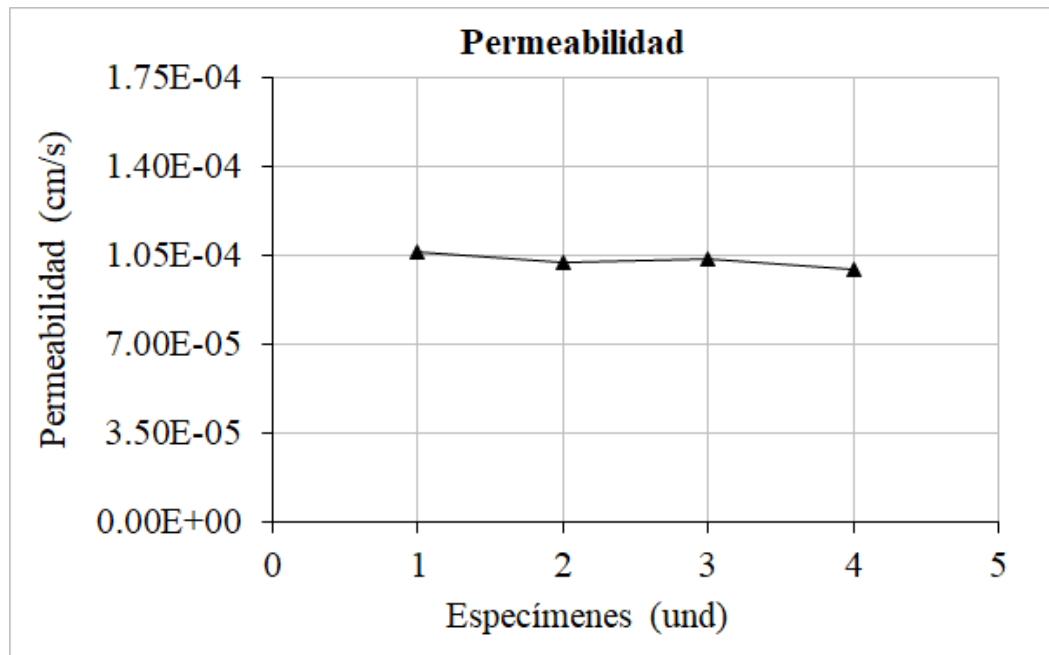
*Permeabilidad de C-3.*

N° de ensayo	1	2	3	4
Presión (mca)	3.52	3.52	3.52	3.52
t (segundos)	5040	5220	5160	5370
T(°C)	15.04	15.41	15.24	15.16
k (cm/s)	9.389E-05	9.065E-05	9.171E-05	8.812E-05
Correc. $n_t/n_{20}$	1.134	1.123	1.128	1.130
$k_{20}$ (cm/s)	1.065E-04	1.018E-04	1.034E-04	9.957E-05

Nota: Elaboración propia

**Figura 30**

*Ensayos realizados vs permeabilidad.*



Nota: Elaboración propia



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. HIPÓTESIS GENERAL

Se propuso lo siguiente: “El aditivo órganosilanos tiene un alto nivel de influencia en la estabilización de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023”, los resultados son los siguientes:

##### 4.1.1. Comportamiento del nivel de influencia en la estabilización

Los resultados para verificar el nivel de influencia en la estabilización se obtuvieron mediante la medición de la capacidad de resistencia utilizando el índice de CBR.

**Tabla 33**

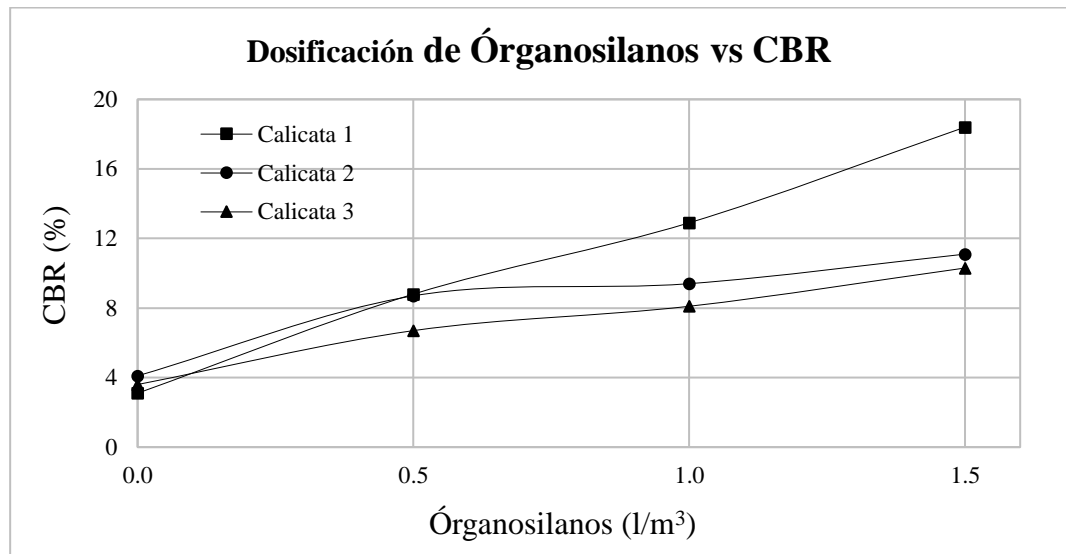
*Índice de CBR, C-1, C-2 y C-3.*

Dosificación de Órganosilanos	l/m <sup>3</sup>	0.0	0.5	1.0	1.5
Calicata 1, C-1					
CBR – 100%	%	3.10	8.80	12.90	18.40
Calicata 2, C-2					
CBR – 100%	%	4.10	8.70	9.40	11.10
Calicata 3, C-3					
CBR – 100%	%	3.60	6.70	8.10	10.30

Nota: Elaboración propia

**Figura 31**

*CBR al 100%.*



Nota: Elaboración propia

Los datos obtenidos muestran un alto nivel de influencia en el CBR con dosificaciones de 0.5, 1.0 y 1.5 l/m³ de tratamiento. Cuando los suelos se saturaron durante 4 días, el valor de CBR aumentó significativamente, alcanzando valores de 10.30%, 11.10% y 18.40%, respectivamente, mejorando así el comportamiento mecánico del suelo y clasificándolo como una subrasante buena.

## 4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1

Se planteó lo siguiente: “La capacidad de soporte de los suelos arcillosos a nivel de subrasante de la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023 se incrementa significativamente por la influencia del aditivo órganosilanos”.

### 4.2.1. Resistencia al esfuerzo

Para determinar la resistencia de los suelos, se llevó a cabo un ensayo de CBR, obteniendo el siguiente resultado:

**Tabla 34**

*Resultados de C\*-1.*

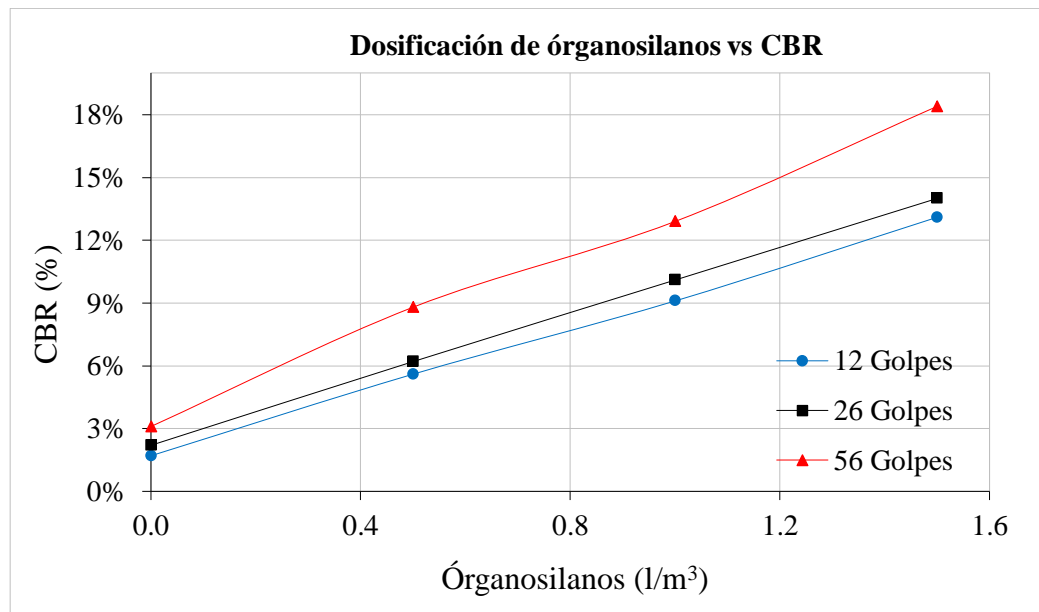
Dosificación de órganosilanos	l/m <sup>3</sup>	0.0	0.5	1.0	1.5
56 golpes	%	3.10	8.80	12.90	18.40
26 golpes	%	2.20	6.20	10.10	14.00
12 golpes	%	1.70	5.60	9.10	13.10
CBR – 100%	%	3.10	8.80	12.90	18.40

Nota: \*C: calicata

Según la imagen 32, el valor del CBR correspondiente a la calicata C-1, experimenta un aumento a medida que la dosificación de órganosilano se incrementa de 0 a 1.5 l/m<sup>3</sup>. Este incremento se observa sin tener en cuenta las variaciones en los niveles de compactación aplicados al suelo. Los resultados indican una mejora constante en la capacidad portante del material.

**Figura 32**

*Dosificación de órganosilanos vs CBR, C-1.*



Nota: A mayor incremento, la dosificación se incrementa

**Tabla 35**

*Resultados de CBR, C-2.*

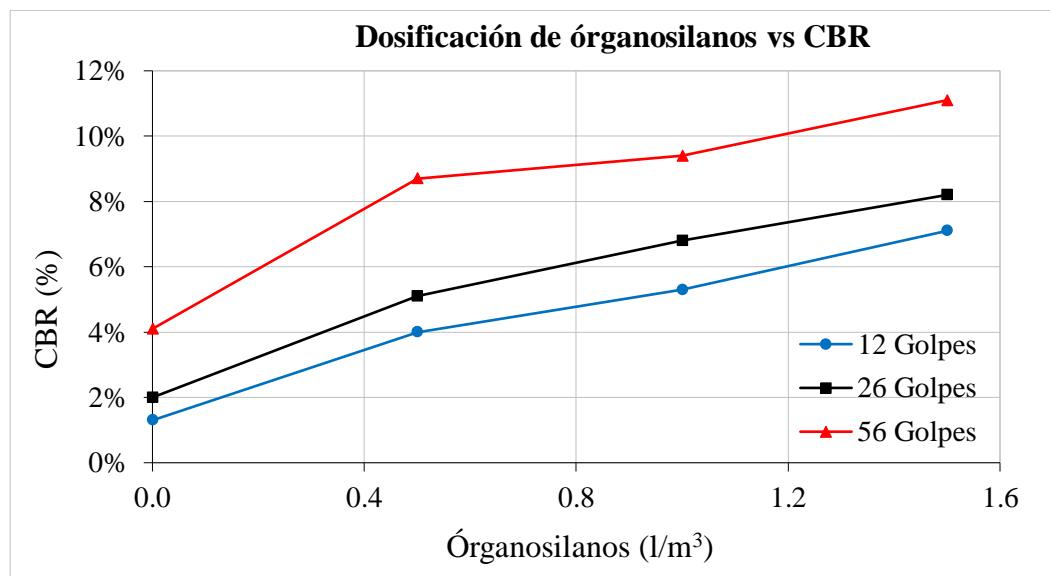
Dosificación de órganosilanos	l/m <sup>3</sup>	0.0	0.5	1.0	1.5
56 golpes	%	4.10	8.70	9.40	11.10
26 golpes	%	2.00	5.10	6.80	8.20
12 golpes	%	1.30	4.00	5.30	7.10
CBR – 100%	%	4.10	8.70	9.40	11.10

Nota: Elaboración propia

De manera similar, la figura 33 ilustra como el valor del CBR para la calicata C-2 se eleva al aumentar la dosificación de órganosilano en un rango de 0 a 1.5 l/m<sup>3</sup>. Este comportamiento se mantiene independientemente de los distintos niveles de compactación utilizados. Así los resultados muestran un comportamiento consistente de mejora en la capacidad portante del suelo.

**Figura 33**

*Dosificación de órganosilanos vs CBR, C-2.*



Nota: Elaboración propia

**Tabla 36**

*Resultados de CBR, C\*-3.*

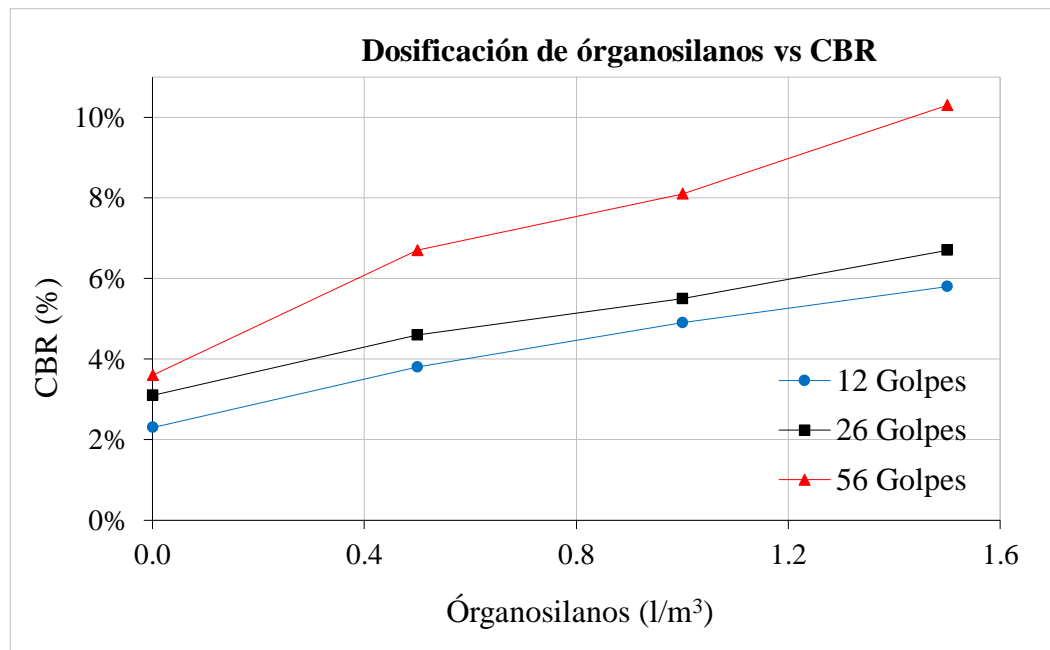
Dosificación de órganosilanos	l/m <sup>3</sup>	0.0	0.5	1.0	1.5
56 golpes	%	3.60	6.70	8.10	10.30
26 golpes	%	3.10	4.60	5.50	6.70
12 golpes	%	2.30	3.80	4.90	5.80
CBR – 100%	%	3.60	6.70	8.10	10.30

Nota: \*C: calicata

Finalmente, en la imagen 34 se puede notar que el valor del CBR para la calicata C-3 también incrementa al aumentar la dosificación de órganosilano de 0 a 1.5 l/m<sup>3</sup>, sin que las diferencias en los niveles de compactación influyan en este comportamiento observado.

**Figura 34**

*Dosificación de órganosilanos vs CBR, C-3.*



Nota: Elaboración propia

#### 4.2.2. Estadísticos descriptivos de CBR

Si  $F > 0.05$ , se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), es decir, la incorporación de órganosilanos no mejora el comportamiento mecánico; si  $F \leq 0.05$ , se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que implica que la incorporación de órganosilanos mejora significativamente su comportamiento mecánico.

**Tabla 37**

*Dosificación de órganosilanos según Análisis de varianza para el CBR.*

Rango de variación	GL	$\Sigma$ de cuadrado	Cuadrado de la media	Valor F	> F
Órganosilanos	3	147.907	49.302	7.109	0.012
Error	8	55.480	6.935		
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>203.387</b>			

Nota: Elaboración propia

Para un grado de confianza del 95% de rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), es decir, se admite que la incorporación de órganosilanos mejora significativamente su comportamiento mecánico.

**Tabla 38**

*Análisis comparativo de Dunnett CBR vs Órganosilanos.*

Diferencia mínima significativa	6.19			
Valor crítico de t de Dunnett	2.88			
Error de cuadrado medio	6.94			
Órganosilanos ( $l/m^3$ )	Media	Diferencia de medias	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1.5	13.267	9.667	3.475	15.856
1.0	10.133	6.533	0.342	12.723
0.5	8.067	4.467	-1.723	10.659
0.0	3.600			

Nota: Elaboración propia

En la tabla 38 indica que la diferencia de medias de Dunnett para las dosificaciones de órganosilanos de 1 y 1.5 tiene un efecto positivo y significativo en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos. Sin embargo, la dosificación de 0.5 no muestra una diferencia significativa.

En conclusión, los análisis estadísticos realizados indican que, con un nivel de confianza del 95%, la incorporación de órganosilanos genera una repercusión favorable y significativa en el avance del comportamiento mecánico de los suelos, en las dosificaciones de 1 y 1.5 l/m<sup>3</sup>. Por otro lado, la dosificación de 0.5 l/m<sup>3</sup> no mostró diferencias significativas, lo que sugiere que se requiere una cantidad mínima de aditivo para alcanzar mejoras efectivas en las propiedades del suelo.

### 4.3. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2

Se planteó lo siguiente: “El aditivo órganosilanos favorece significativamente en la expansividad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023”. Los resultados son los siguientes:

#### 4.3.1. Expansión

**Tabla 39**

*Resultados de expansión para la muestra C-1.*

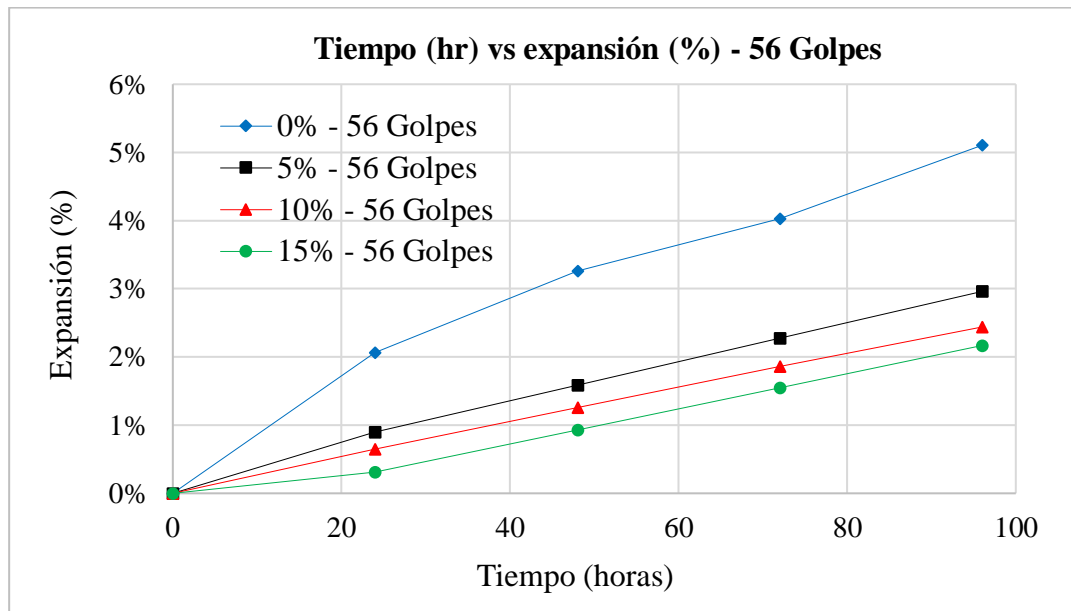
Tiempo (horas)	0.0 l/m <sup>3</sup>	0.5 l/m <sup>3</sup>	1.0 l/m <sup>3</sup>	1.5 l/m <sup>3</sup>
	Expansión (%)			
0	0.00	0.00	0.00	0.00
24	2.06	0.89	0.65	0.31
48	3.26	1.58	1.26	0.93
72	4.03	2.27	1.86	1.55
96	5.10	2.96	2.44	2.17

Nota: Trabajo realizado por el autor

Como se muestra en la figura 35, sin aditivo órganosilano, a medida que transcurre el tiempo, el suelo expuesto a condiciones de humedad tiende a saturarse. Este fenómeno provoca la separación de las partículas de suelo, resultando en una expansión volumétrica significativa. Sin embargo, al agregar órganosilano, se modifica la interacción entre las partículas del suelo. Se evidencia una reducción en la expansión, ya que el aditivo ayuda a estabilizar las partículas y a minimizar la absorción de agua.

**Figura 35**

*Relación entre tiempo y expansión para la muestra C-1.*



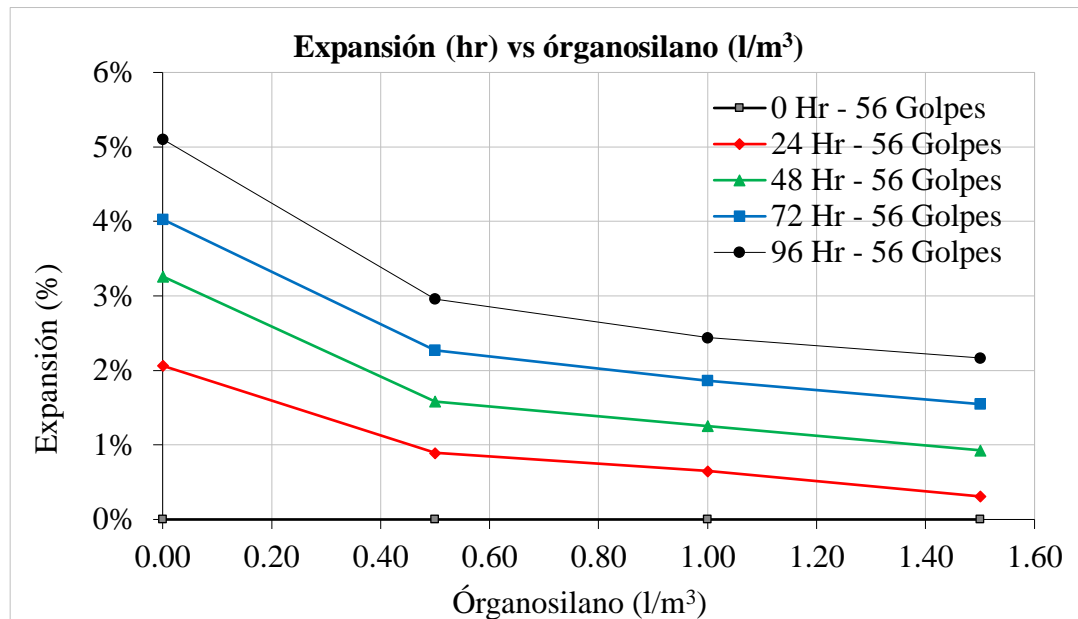
Nota: Desarrollo propio

En la figura 36 se observa que, sin aditivo de órganosilano, los suelos presentan un comportamiento expansión notable. Este fenómeno se debe a su plasticidad y a la capacidad de retención de agua. Sin embargo, conforme se incrementa la dosificación de órganosilano, se registra una disminución en la expansión del suelo.



**Figura 36**

*Dosificación de órganosilanos vs expansión en la muestra C-1.*



Nota. Elaboración propia

**Tabla 40**

*Resultados de expansión para la muestra C-2.*

Tiempo (horas)	0.0 l/m <sup>3</sup>	0.5 l/m <sup>3</sup>	1.0 l/m <sup>3</sup>	1.5 l/m <sup>3</sup>
	Expansión (%)			
0	0.00	0.00	0.00	0.00
24	1.17	0.85	0.42	0.28
48	2.34	1.70	0.84	0.56
72	3.51	2.56	1.25	0.84
96	4.11	2.94	1.49	1.12

Nota: Elaboración Propia

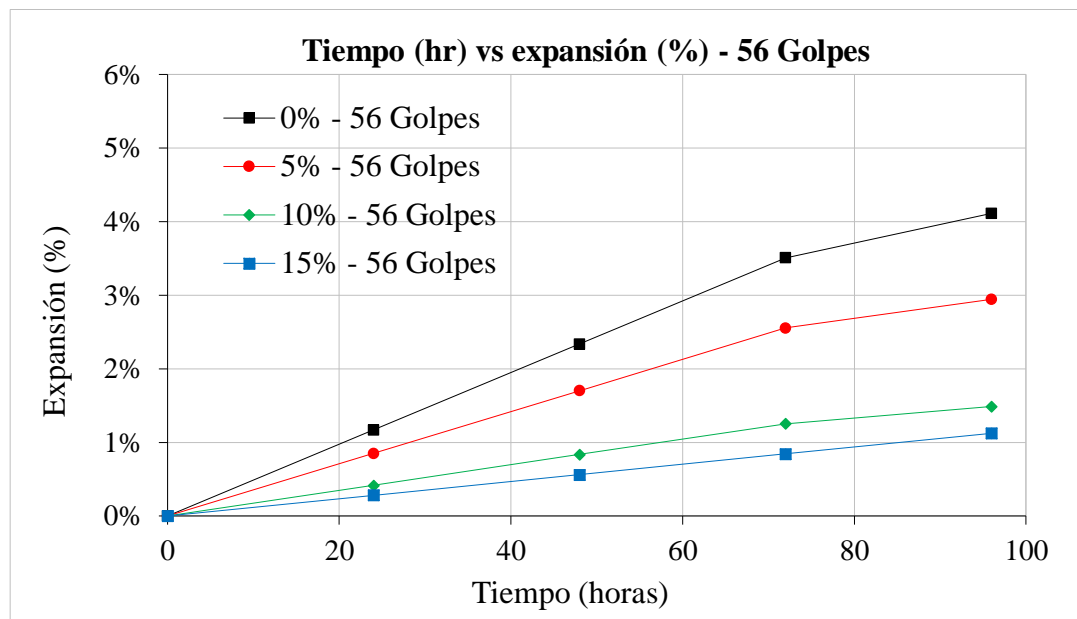
En el esquema 37 puede lograrse que, en ausencia del aditivo órganosilano, el suelo expuesto a condiciones de humedad tiende a saturarse con el tiempo. Este fenómeno provoca la separación de las partículas del suelo, lo que conlleva a una expansión volumétrica considerable. Por otro lado, la adición de órganosilano altera la interacción entre las partículas del suelo, lo que resulta en una

disminución de la expansión. Este aditivo actúa estabilizando las partículas y reduciendo la absorción de agua.

Al analizar la figura 37, se aprecia que, en ausencia de órganossilano, el suelo expuesto a condiciones de humedad tiende a saturarse con el paso del tiempo. Este proceso provoca la disgregación de las partículas de suelo, ocasionando una expansión volumétrica importante. Sin embargo, al incorporar órganossilano, se altera la dinámica de interacción entre las partículas, lo que se traduce en una disminución de la expansión, ya que el aditivo contribuye a la estabilización de las partículas y a la reducción de la absorción de agua.

**Figura 37**

*Relación entre tiempo y expansión para la muestra C-2.*



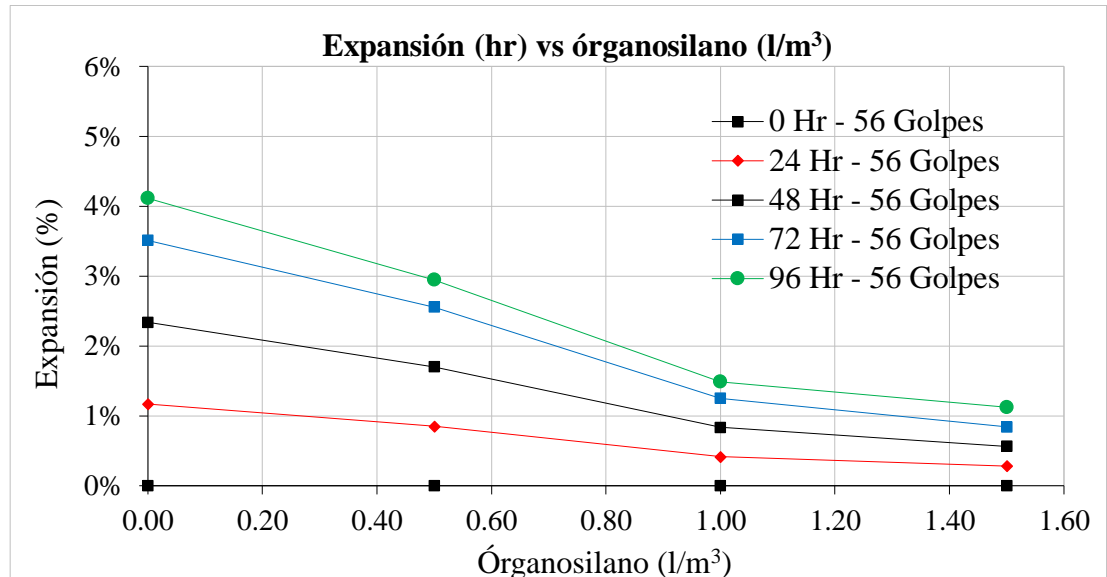
Nota: Elaboración propia

En el esquema 38, se observa que, en ausencia de órganossilano, los suelos exhiben un comportamiento expansivo considerable. Este fenómeno se atribuye a la plasticidad inherente del suelo y a su capacidad de retención de agua. No

obstante, al aumentar la dosificación de órganosilano, se registra una notable reducción en la expansión del suelo.

**Figura 38**

*Dosificación de órganosilanos vs expansión en la muestra C-2.*



Nota. Elaboración propia

**Tabla 41**

*Resultados de expansión para la muestra C-3.*

Tiempo (horas)	0.0 l/m <sup>3</sup>	0.5 l/m <sup>3</sup>	1.0 l/m <sup>3</sup>	1.5 l/m <sup>3</sup>
	Expansión (%)			
0	0.00	0.00	0.00	0.00
24	1.37	0.84	0.49	0.42
48	2.75	1.59	0.98	0.84
72	4.12	2.25	1.47	1.26
96	4.52	3.00	1.96	1.68

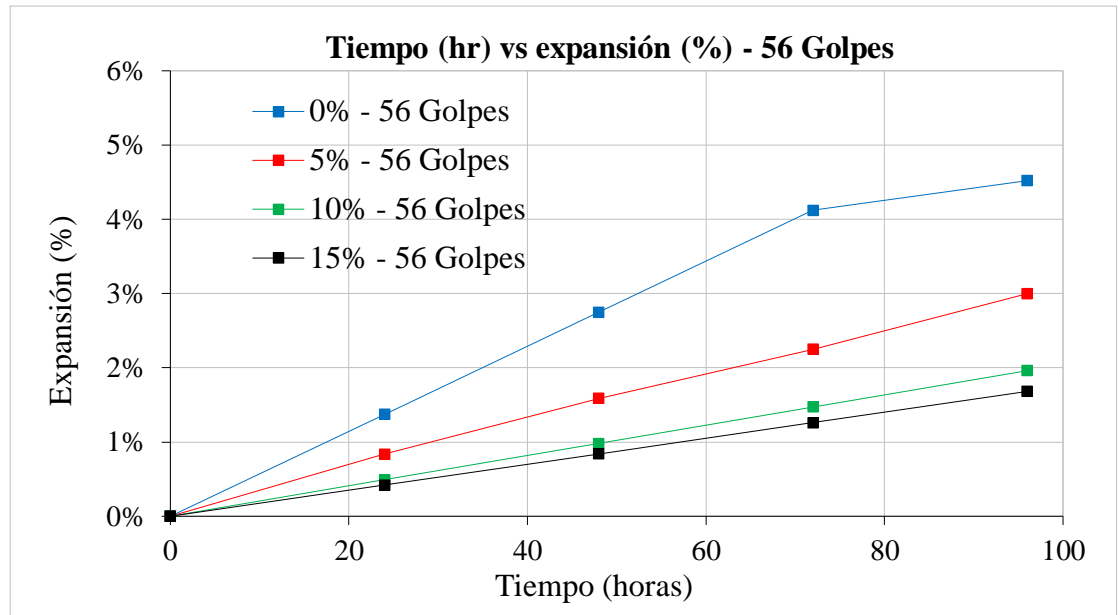
Nota: Elaboración Propia

En la figura 39 se observa que, sin la presencia de órganosilano, a medida que avanza el tiempo, el suelo expuesto a condiciones de humedad tiende a saturarse. Este fenómeno genera la separación entre las partículas del suelo, resultando en una expansión volumétrica considerable. No obstante, con la

incorporación de órganosilano, se modifica la interacción entre las partículas, lo que se traduce en una disminución de la expansión, dado que el aditivo contribuye a estabilizar las partículas y a reducir la absorción de agua.

### Figura 39

*Relación entre tiempo y expansión para la muestra C-3.*

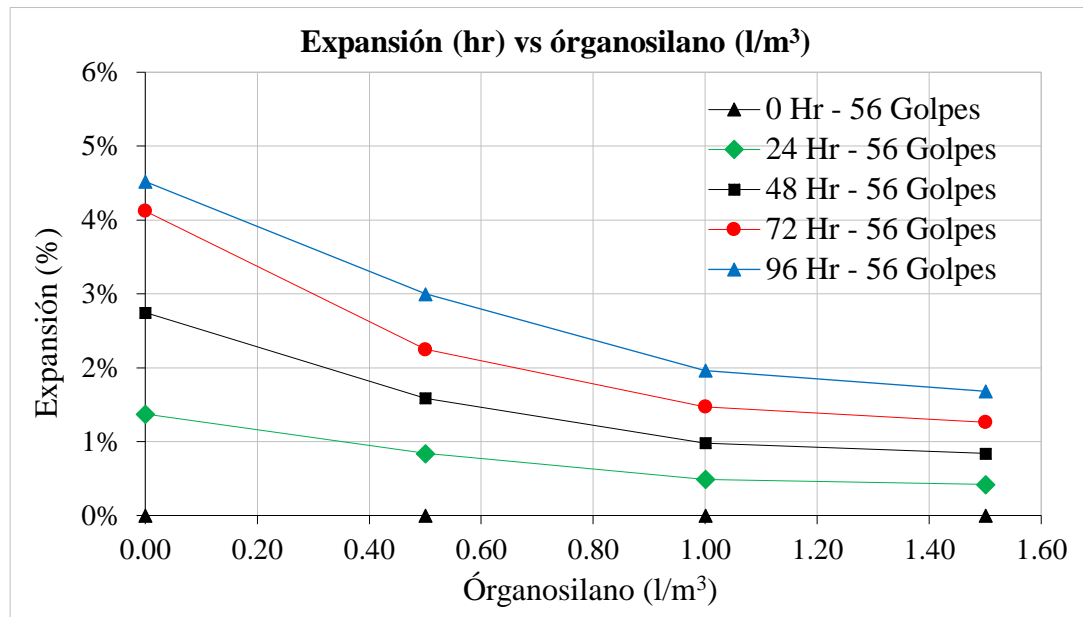


Nota: Elaboración propia

En el esquema 40, en ausencia de órganosilano, los suelos presentan un comportamiento expansivo notable. Este comportamiento se asocia a su plasticidad y a la capacidad de retención de agua. Sin embargo, al incrementar la dosificación de órganosilano, se documenta una disminución significativa en la expansión del suelo.

**Figura 40**

*Dosificación de órganosilanos vs expansión en la muestra C-3.*



Nota. Elaboración propia

#### 4.3.2. Estadísticos descriptivos de expansión

Si  $F > 0.05$ , se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), es decir, la incorporación de órganosilanos no tiene un efecto significativo en la expansividad; si  $F \leq 0.05$ , se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que implica que la incorporación de órganosilanos mejora significativamente en la expansividad.

**Tabla 42**

*Análisis de varianza para la expansión según dosificación de órganosilanos.*

Rango de variación	GL	$\Sigma$ de cuadrado	Cuadrado de la media	Valor F	> F
Órganosilanos	3	15.574	5.191	27.685	0.000
Error	8	1.500	0.188		
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>17.074</b>			

Nota: Elaboración propia

Para un 95% de nivel de confianza se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), es decir, se acepta que la incorporación de órganosilanos mejora significativamente en la expansividad.

**Tabla 43**

*Comparación de medias de mínimos cuadrados para expansividad.*

Órganosilano (l/m <sup>3</sup> )	Casos	Media	Desviación estándar	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1.5	3	1.657	0.525	0.303	0.352	2.962
1.0	3	1.963	0.475	0.274	0.783	3.143
0.5	3	2.967	0.031	0.018	2.891	3.043
0.0	3	4.577	0.497	0.287	3.341	5.812
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>2.791</b>	<b>1.246</b>	<b>0.360</b>	<b>1.999</b>	<b>3.582</b>

Nota: Elaboración propia

Según la tabla 43, la expansividad del suelo disminuye a medida que aumenta la dosificación del aditivo órganosilano lo que indica que este aditivo reduce la expansividad. Los intervalos de confianza confirman que, con un nivel de confianza del 95%, las dosificaciones más altas (1 y 1.5 l/m<sup>3</sup>) generan una menor expansividad en los suelos en comparación con el suelo sin aditivo

**Tabla 44**

*Prueba de medias de Tukey,  $\alpha = 0.05$ .*

Órganosilano (l/m <sup>3</sup> )	0.0	0.5	1.0	1.5
0.0		0.008	0.000	0.000
0.5			0.084	0.025
1.0				0.821
1.5				

Nota: Elaboración propia

Se observa que existen diferencias significativas entre los tratamientos 0.5 y 1.5 l/m<sup>3</sup>, ya que el p-valor (0.025) es menor a la significancia  $\alpha = 0.05$ , mientras que con los demás tratamientos las diferencias no son significativas, aseveración que se hace para un 95% de nivel de confianza.

#### 4.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3

Se planteó lo siguiente: “Los efectos que genera el aditivo órganosilanos en la permeabilidad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023, son positivos”.

##### 4.4.1. Permeabilidad del suelo

**Tabla 45**

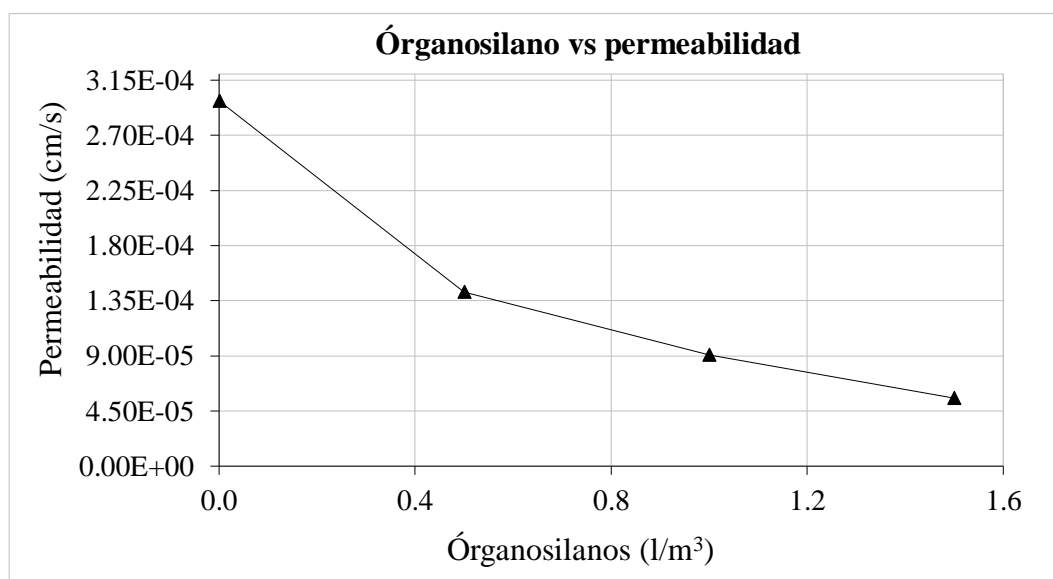
*Permeabilidad para la muestra C-1.*

Órganosilanos l/m <sup>3</sup>	0.00	0.50	1.00	1.50
k <sub>20</sub> (cm/s)	2.981E-04	1.422E-04	9.092E-05	5.550E-05

Nota: Elaboración propia

**Figura 41**

*Órganosilanos vs permeabilidad para la muestra C-1.*



Nota. Elaboración propia

Según la figura 41, en la muestra C-1, a medida que aumenta la dosificación de órganossilano, la permeabilidad del suelo disminuye, lo que se debe a la reducción de la porosidad, así como el incremento en la hidrofobicidad y la compactación del material.

**Tabla 46**

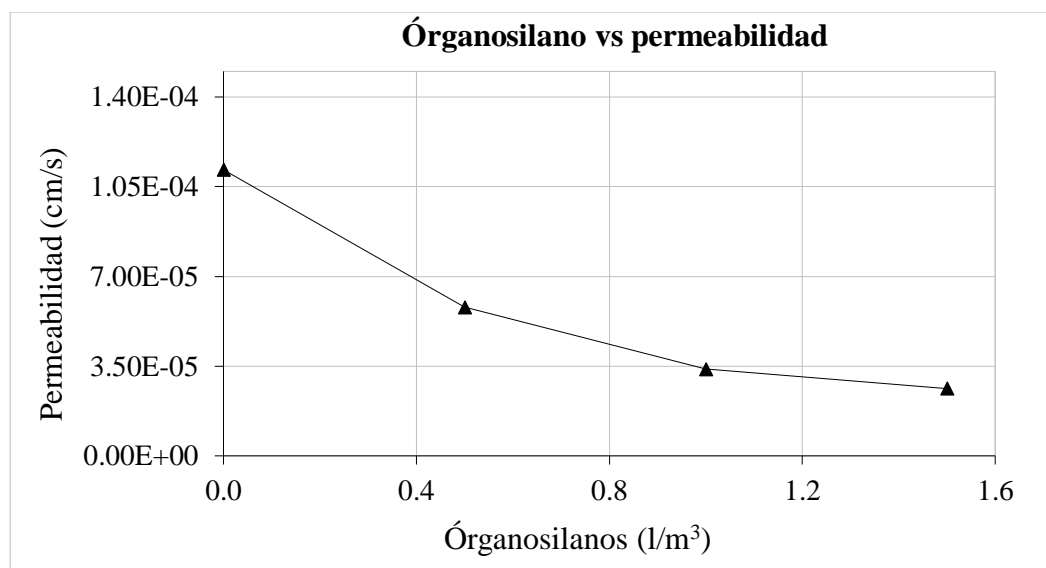
*Permeabilidad para la muestra C-2.*

Órganossilanos (l/m <sup>3</sup> )	0.00	0.50	1.00	1.50
k <sub>20</sub> (cm/s)	1.116E-04	5.797E-05	3.384E-05	2.623E-05

Nota: Elaboración propia

**Figura 42**

*Órganossilanos vs permeabilidad para la muestra C-2.*



Nota. Elaboración propia

De acuerdo con la figura 42, en la muestra C-2, el aumento en la dosificación de órganossilano provoca una disminución en la permeabilidad del suelo. Esto se atribuye a la reducción en la porosidad del suelo y al incremento tanto en la compactación como en la hidrofobicidad.



**Tabla 47**

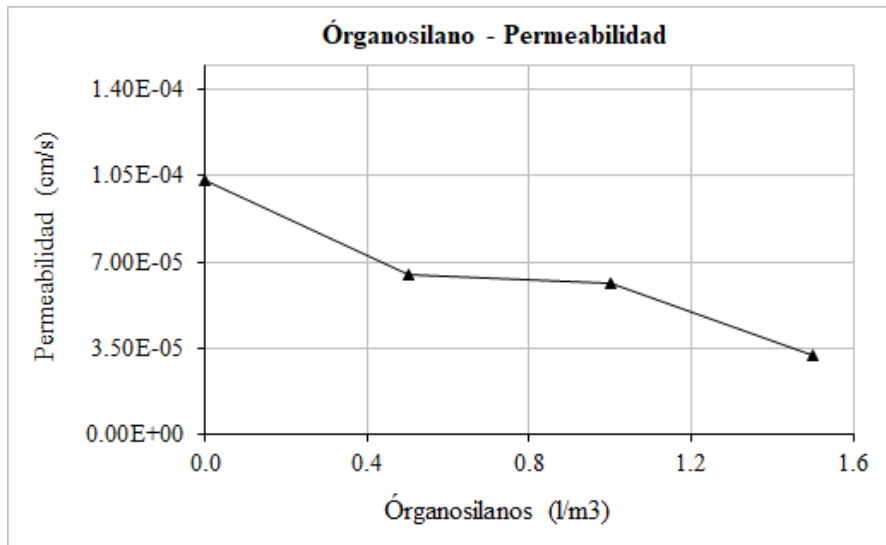
*Permeabilidad para la muestra C-3.*

Órganosilanos (l/m <sup>3</sup> )	0.00	0.50	1.00	1.50
k <sub>20</sub> (cm/s)	1.028E-04	6.504E-05	6.138E-05	3.193E-05

Nota: Elaboración propia

**Figura 43**

*Órganosilanos vs permeabilidad para la muestra C-3.*



Nota. Elaboración propia

Como se observa en la figura 43, para la muestra C-3, al incrementar la dosificación de órganosilano, la permeabilidad del suelo se reduce. Esta disminución es resultado de una menor porosidad y un aumento en la compactación y el comportamiento hidrofóbico del suelo.

#### 4.4.2. Estadísticos descriptivos de permeabilidad

Si  $F > 0.05$ , se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), es decir, el uso de aditivo órganosilano no modifica la permeabilidad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante.; si  $F \leq 0.05$ , se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que implica que el uso de aditivo órganosilano mejora significativamente la permeabilidad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante.

**Tabla 48***Comparación de medias de la permeabilidad.*

	N	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
Permeabilidad del suelo	12	8.979E-05	7.441E-05	2.620E-05	2.981E-04
Órganosilano	12	2.50	1.168	1	4

Nota: Elaboración propia

La tabla 48 presenta las estadísticas descriptivas de dos conjuntos de datos: permeabilidad del suelo y dosificación de órganosilano. Para la permeabilidad del suelo, sugiere que la media está en un rango relativamente amplio, lo que refleja variabilidad en las mediciones. En cuanto al órganosilano, la media de 2.50 está bien acotada entre los límites de dosificación de 1 y 4.

**Tabla 49***Prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.*

Órganosilano l/m <sup>3</sup>	N	Rango promedio
1.5	3	2.33
1.0	3	5.67
0.5	3	7.67
0.0	3	10.33
<b>Total</b>	<b>12</b>	

Nota: Elaboración propia

Para un 95% de nivel de confianza se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), es decir, se acepta el uso de aditivo órganosilano mejora significativamente la permeabilidad de los suelos arcillosos a nivel de subrasante.

**Tabla 50**

*Prueba de Medias de Tukey,  $\alpha = 0.05$ .*

<b>Órganosilano</b>	<b>Permeabilidad de suelo</b>
Chi-cuadrado	7.872
GL*	3
Sig. asintótica	0.049

Nota: \*GL: Grados de libertad

Se reporta un valor de chi-cuadrado de 7.872 y una significación asintótica de 0.049, lo que sugiere que hay diferencias significativas en la permeabilidad del suelo según los diferentes niveles de aditivo órganosilano aplicado. Como el p-valor (0.049) es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), lo que implica que el órganosilano tiene un efecto sobre la permeabilidad del suelo.

#### **4.5. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 4**

Se planteó lo siguiente: “Al utilizar órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas se obtiene un índice de plasticidad óptimo para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023”.

##### **4.5.1. Límites de consistencia**

**Tabla 51**

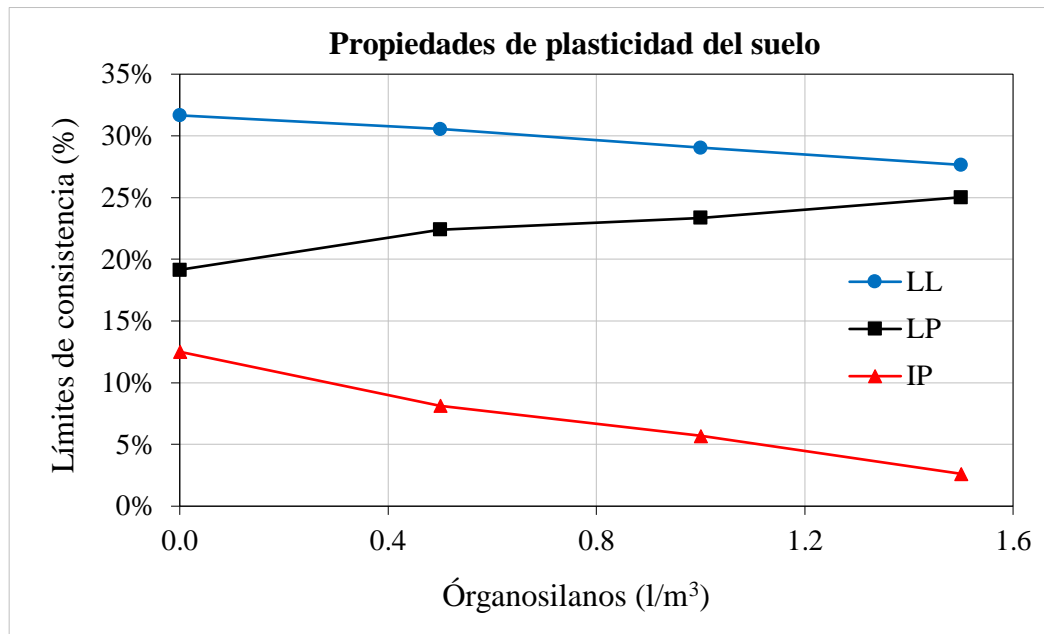
*Límites de consistencia obtenidos para la muestra C-1.*

<b>Órganosilano (<math>l/m^3</math>)</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
0.0	31.67	19.15	12.51
0.5	30.56	22.41	8.14
1.0	29.04	23.35	5.69
1.5	27.65	25.03	2.63

Nota: Elaboración propia

**Figura 44**

*Límites de consistencia en la muestra C-1.*



Nota. Elaboración propia

En la figura 44 de la muestra C-1, se observa que la adición de órganosilano tiene un efecto significativo en las propiedades de plasticidad del suelo. La reducción del límite líquido y del índice de plasticidad, junto con el comportamiento del límite plástico, sugiere que el aditivo mejora las características mecánicas del suelo, haciéndolo menos plástico y más estable.

**Tabla 52**

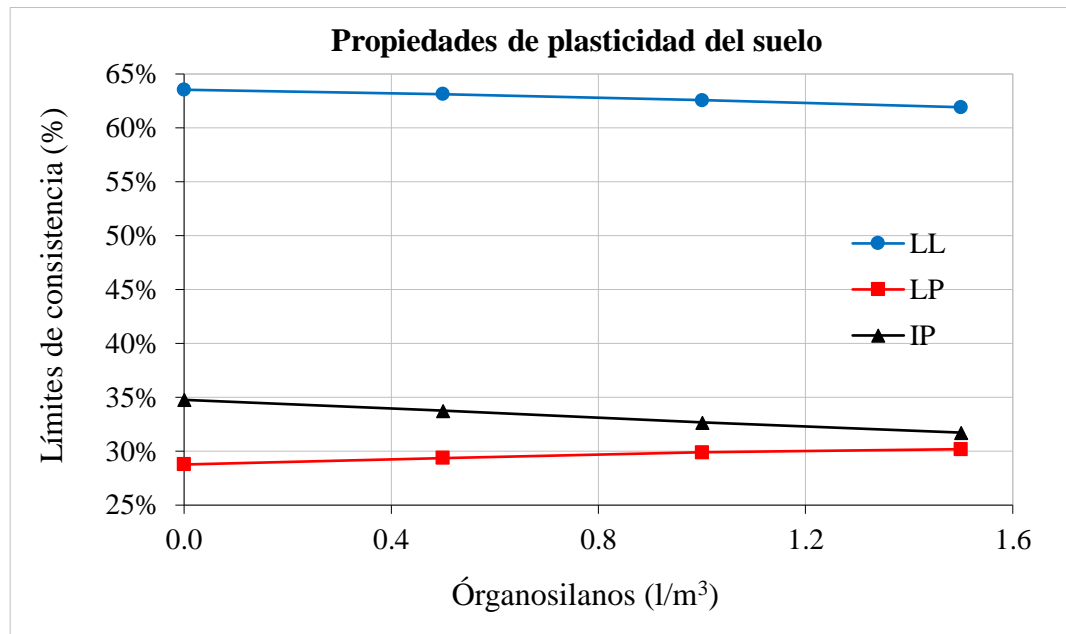
*Límites de consistencia obtenidos para la muestra C-2.*

Órganosilano (l/m <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0.0	63.54	28.77	34.77
0.5	63.16	29.38	33.78
1.0	62.58	29.90	32.68
1.5	61.95	30.19	31.75

Nota: Elaboración propia

**Figura 45**

*Límites de consistencia en la muestra C-2.*



Nota. Elaboración propia

En la figura 45, se observa que, en la muestra C-2, la adición de órganosilano tiene un efecto notable en las propiedades de plasticidad del suelo. A pesar de que se registra un ligero aumento en el límite plástico, la reducción del límite líquido y del índice de plasticidad sugiere una mejora en las características mecánicas del suelo, lo que hace más estable y menos susceptible a la deformación.

**Tabla 53**

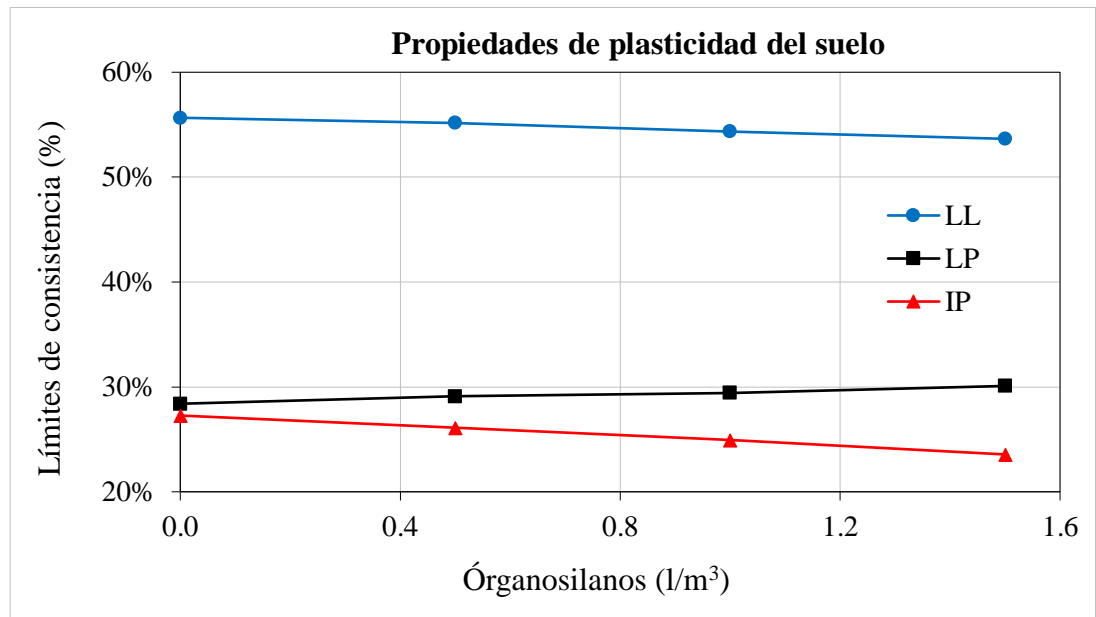
*Límites de consistencia obtenidos para la muestra C-3.*

Órganosilano (l/m <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0.0	55.70	28.39	27.31
0.5	55.21	29.09	26.12
1.0	54.35	29.43	24.92
1.5	53.70	30.09	23.61

Nota: Elaboración propia

**Figura 46**

*Límites de consistencia en la muestra C-3.*



Nota. Elaboración propia

En la figura 46, se evidencia que la incorporación de órganosilano tiene un impacto significativo en las propiedades de plasticidad del suelo. A pesar de observarse un ligero incremento en el límite plástico, la disminución tanto del límite líquido como del índice de plasticidad indica una mejora en las características mecánicas del suelo, contribuyendo a su estabilidad y haciéndole menos propenso a la deformación.

#### 4.5.2. Estadísticos descriptivos de índice de plasticidad

Si  $F > 0.05$ , se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), es decir, el uso de órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas no tiene efecto sobre el índice de plasticidad de la subrasante; si  $F \leq 0.05$ , se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que implica que el uso de órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas mejora el índice de plasticidad de la subrasante.

**Tabla 54***Análisis de varianza aplicado al índice de plasticidad.*

Rango de variación	GL	$\Sigma$ de cuadrado	Cuadrado de la media	Valor F	> F
Órganosilanos	3	49.817	16.606	0.092	0.962
Error	8	1440.810	180.101		
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>1490.627</b>			

Nota: Elaboración propia

En la tabla 54, con un nivel de confianza del 95%, se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se rechaza la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que indica la variabilidad observada en el índice de plasticidad no se debe a la aplicación del aditivo, lo que indica que no se ha logrado un índice de plasticidad óptimo mediante su uso.

**Tabla 55***Comparación de medias por mínimos cuadrados del índice de plasticidad.*

Órganosilano (l/m <sup>3</sup> )	Casos	Media	Desviación estándar	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite	
					inferior	superior
1.5	3	19.330	15.024	8.674	-17.992	56.652
1.0	3	21.096	13.895	8.022	-13.421	55.614
0.5	3	22.680	13.161	7.598	-10.015	55.375
0.0	3	24.863	11.329	6.541	-3.281	53.008
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>21.992</b>	<b>11.640</b>	<b>3.360</b>	<b>14.596</b>	<b>29.388</b>

Nota: Elaboración propia

La tabla 55 sugiere que el índice de plasticidad tiende a disminuir con el aumento de la dosificación de órganosilano, siendo más alto en la mezcla sin aditivo (0 l/m<sup>3</sup>) y disminuyendo gradualmente hasta el tratamiento con 1.5 l/m<sup>3</sup>.

#### 4.6. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 5

Se planteó lo siguiente: “Al utilizar órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas se mejora la densidad para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023”.

**Tabla 56**

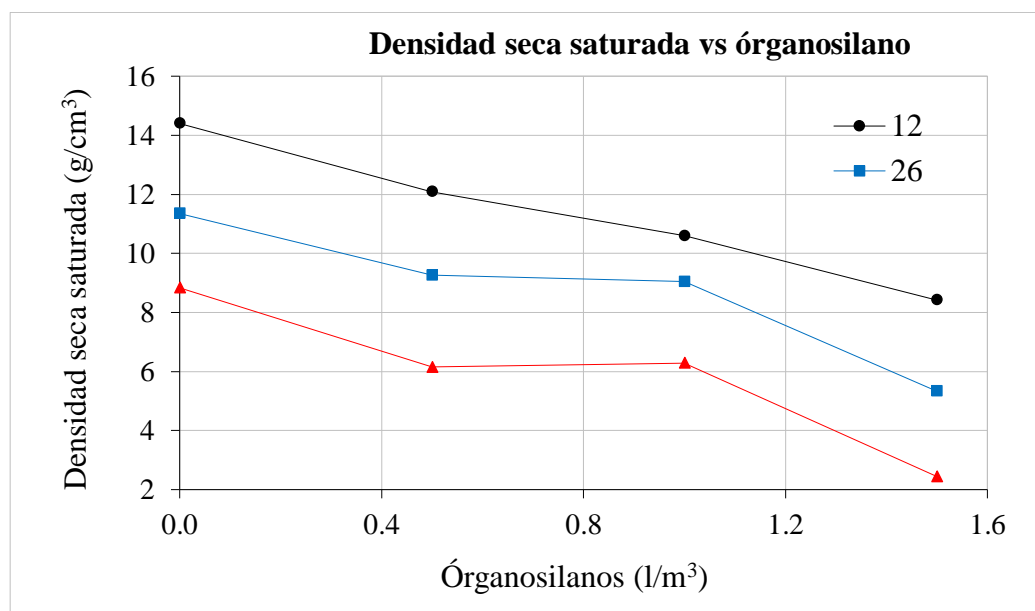
*Densidad seca saturada de la muestra C-1.*

Órganosilano ( $l/m^3$ )	12 golpes	26 golpes	56 golpes
0.0	14.40	11.35	8.83
0.5	12.09	9.26	6.15
1.0	10.59	9.05	6.28
1.5	8.42	5.33	2.44

Nota: Elaboración propia

**Figura 47**

*Densidad seca saturada, muestra C-1.*



Nota. Elaboración propia

La figura 47, de la muestra C-1, se puede observar que el uso de órganosilano a altos niveles ( $1.5 l/m^3$ ) reduce significativamente la densidad, lo que puede comprometer la estabilidad y el comportamiento mecánico del suelo.



**Tabla 57**

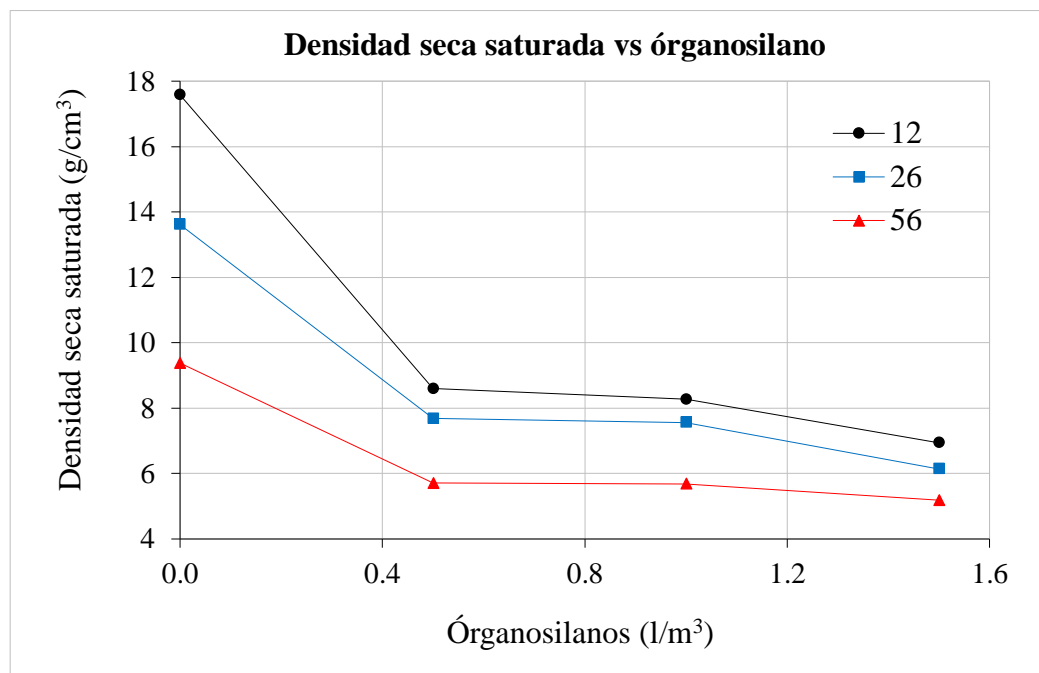
*Densidad seca saturada de la muestra C-2.*

Órganosilano ( $l/m^3$ )	12 golpes	26 golpes	56 golpes
0.0	17.58	13.61	9.38
0.5	8.59	7.69	5.71
1.0	8.27	7.56	5.69
1.5	6.94	6.14	5.19

Nota: Elaboración propia

**Figura 48**

*Densidad seca saturada, muestra C-2.*



Nota. Elaboración propia

La figura 48, muestra que la adición de órganosilano tiene un efecto drástico y negativo en la densidad seca saturada de la muestra C-2, con valores que disminuyen a medida que se aumenta la dosificación del aditivo. Esto sugiere que las concentraciones de órganosilano utilizadas en este estudio podrían ser demasiado altas para optimizar la densidad y, por ende, la estabilidad del suelo.

**Tabla 58**

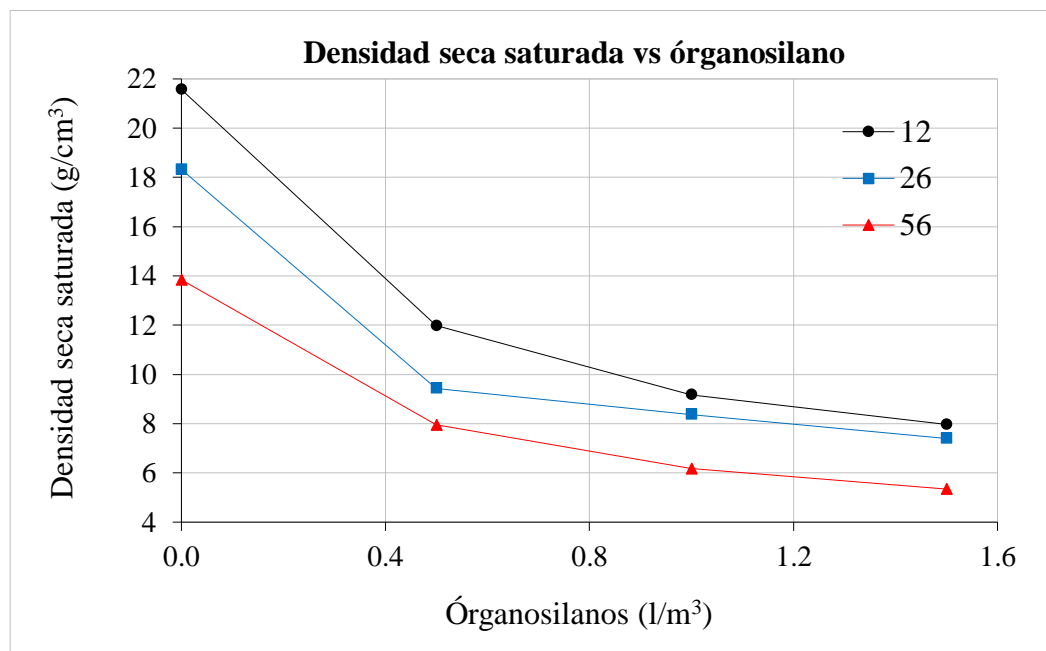
*Densidad seca saturada de la muestra C-3.*

Órganosilano ( $l/m^3$ )	12 golpes	26 golpes	56 golpes
0.0	21.57	18.32	13.84
0.5	11.98	9.44	7.95
1.0	9.17	8.38	6.17
1.5	7.97	7.40	5.34

Nota: Elaboración propia

**Figura 49**

*Densidad seca saturada, muestra C-3.*



Nota. Elaboración propia

La figura 49, indica que la adición de órganosilano tiene un efecto adverso significativo en la densidad seca saturada de la muestra C-3, con una reducción notable a medida que se aumenta la dosificación del aditivo. La densidad seca saturada es fundamental, ya que afecta directamente la resistencia y estabilidad del suelo bajo carga. Una disminución en esta densidad puede comprometer la integridad estructural de las subrasantes, aumentando la vulnerabilidad a deformaciones y fallas.

#### 4.6.1. Estadísticos descriptivos de Densidad

Si  $F > 0.05$ , se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), es decir, no hay mejora en la densidad de los suelos arcillosos al utilizar órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas para la estabilización de la subrasante; si  $F \leq 0.05$ , se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que implica que al utilizar órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas, se mejora la densidad de los suelos arcillosos para la estabilización de la subrasante.

**Tabla 59**

*Análisis de varianza aplicado a la densidad seca saturada.*

<b>Rango de variación</b>	<b>GL</b>	<b><math>\Sigma</math> de cuadrado</b>	<b>Cuadrado de la media</b>	<b>Valor F</b>	<b>&gt; F</b>
Órganosilanos	3	65.305	21.768	7.428	0.011
Error	8	23.444	2.930		
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>88.748</b>			

Nota: Elaboración propia

En la tabla 59, con un nivel de confianza del 95%, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que indica que si hay diferencias significativas en la densidad seca saturada de los suelos al utilizar órganosilanos como aditivo.

**Tabla 60***Comparación de medias de mínimos cuadrados para densidad seca saturada.*

Órganosilano (l/m <sup>3</sup> )	Casos	Media	Desviación estándar	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite	
					inferior	superior
1.5	3	4.323	1.633	0.943	0.267	8.379
1.0	3	6.047	0.314	0.181	5.267	6.826
0.5	3	6.603	1.187	0.685	3.655	9.551
0.0	3	10.683	2.748	1.586	3.858	17.509
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>6.914</b>	<b>2.840</b>	<b>0.820</b>	<b>5.109</b>	<b>8.719</b>

Nota: Elaboración propia

Según la tabla 60, se puede decir que la media más baja se observa con 1.5 l/m<sup>3</sup> (4.323), mientras que la media más alta es con 0 l/m<sup>3</sup> (10.683). Esto sugiere que la presencia de órganosilanos tiende a reducir la densidad seca saturada en comparación con la ausencia de aditivo.

**Tabla 61***Prueba de medias de Tukey,  $\alpha = 0.05$ .*

Órganosilano (l/m <sup>3</sup> )	0.0	0.5	1.0	1.5
0.0		0.075	0.043	0.008
0.5			0.977	0.415
1.0				0.625
1.5				

Nota: Elaboración propia

Se observa que existen diferencias significativas entre los tratamientos 1 y 1.5 l/m<sup>3</sup>, ya que el p-valor (0.043 y 0.008) es menor a la significancia  $\alpha = 0.05$ , mientras que con los demás tratamientos las diferencias no son significativas, proposición sustentada con un 95% de probabilidad.

#### 4.7. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 6

Se planteó lo siguiente: “Al utilizar órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas se obtiene una humedad óptima para la estabilización de la subrasante en la pista de salida Cusco – Juliaca, 2023”.

**Tabla 62**

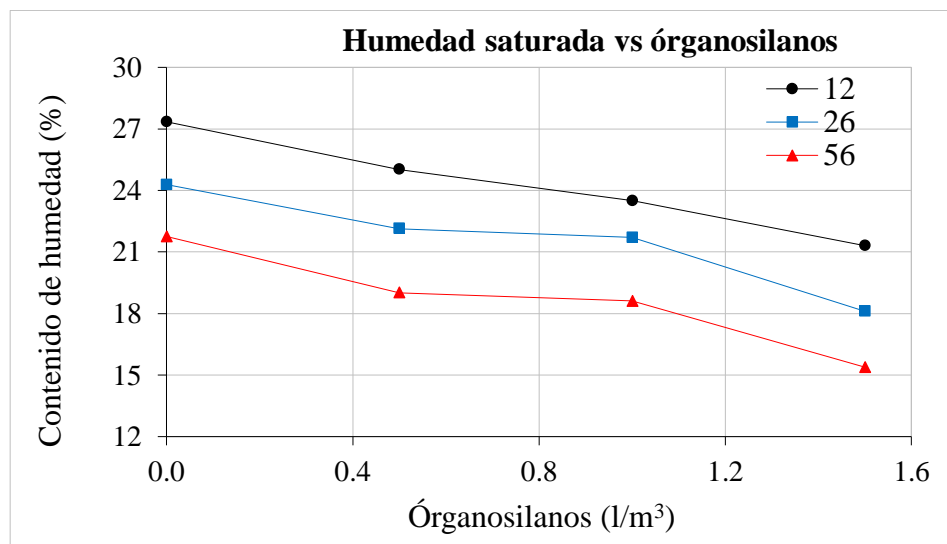
*Humedad saturada de la muestra C-1.*

Órganosilano ( $l/m^3$ )	12 golpes	26 golpes	56 golpes
0.0	27.35	24.29	21.76
0.5	25.02	22.13	19.02
1.0	23.51	21.71	18.60
1.5	21.31	18.11	15.39

Nota: Elaboración propia

**Figura 50**

*Humedad saturada, muestra C-1.*



Nota. Elaboración propia

La figura 50 indica que, a menor compactación, el suelo retiene mayor cantidad de humedad. La pendiente de las líneas indica que el efecto del órganosilano es más pronunciado en niveles de compactación más altos, ya que el contenido de humedad saturada disminuye más rápidamente en este caso.

**Tabla 63**

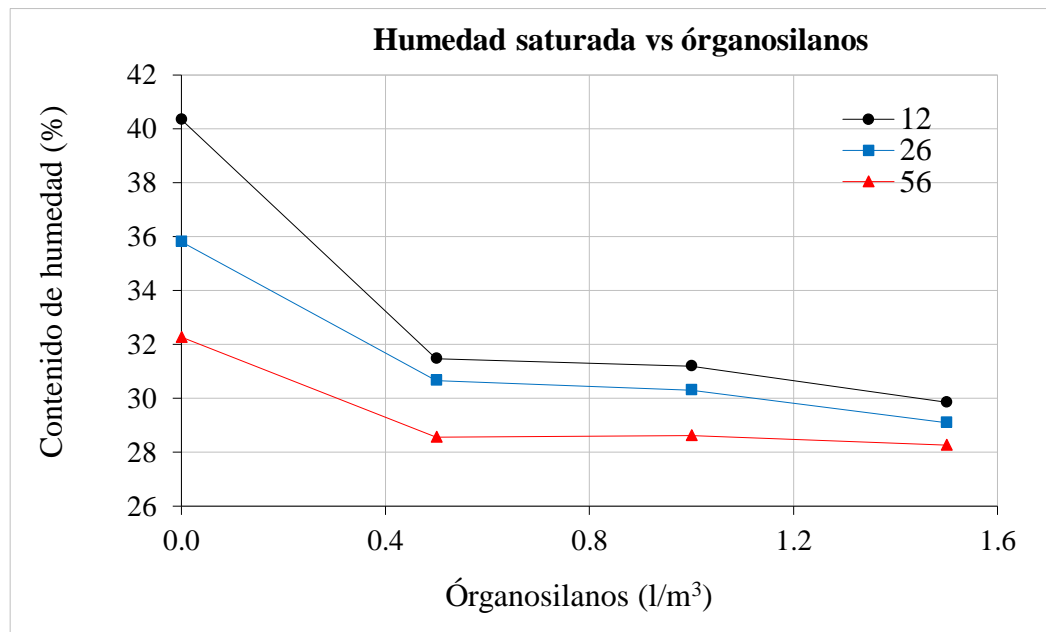
*Humedad saturada de la muestra C-2.*

Órganosilano ( $l/m^3$ )	12 golpes	26 golpes	56 golpes
0.0	40.35	35.81	32.27
0.5	31.48	30.66	28.57
1.0	31.20	30.31	28.63
1.5	29.86	29.10	28.26

Nota: Elaboración propia

**Figura 51**

*Humedad saturada, muestra C-2.*



Nota. Elaboración propia

En la figura 51 el contenido de humedad saturada disminuye consistentemente en todos los niveles de compactación conforme aumenta la dosificación de órganosilanos, lo que evidencia una interacción entre el aditivo y las características del suelo que reduce su capacidad de retener agua. Esto podría indicar que, en suelos más densos, la capacidad de los órganosilanos para reducir la humedad está limitada por la baja porosidad del material.

**Tabla 64**

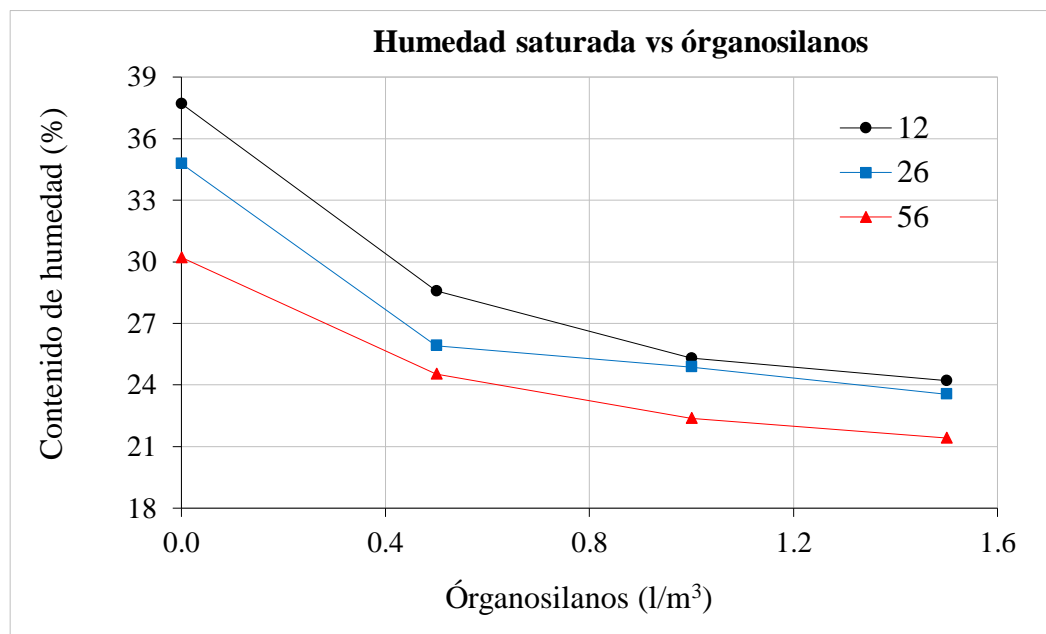
*Humedad saturada de la muestra C-3.*

Órganosilano ( $l/m^3$ )	12 golpes	26 golpes	56 golpes
0.0	37.70	34.78	30.21
0.5	28.58	25.92	24.54
1.0	25.30	24.87	22.38
1.5	24.21	23.55	21.42

Nota: Elaboración propia

**Figura 52**

*Humedad saturada, muestra C-3.*



Nota. Elaboración propia

La diagramación 52 ilustra que la disminución más significativa en el contenido de humedad saturada ocurre entre las dosificaciones de 0.0 y 0.5  $l/m^3$  de órganosilanos, indicando un posible límite de saturación del aditivo. A partir de este punto, su influencia en la disminución de humedad es menos notoria. Aunque los suelos con menor compactación presentan mayores valores de humedad, las diferencias entre niveles de compactación disminuyen con dosificaciones crecientes. Esto evidencia que el aditivo reduce la retención de

agua, siendo más efectivo en suelos menos densos, donde la disminución es más pronunciada.

#### 4.7.1. Estadísticos descriptivos de Humedad saturada

Si  $F > 0.05$ , se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), es decir, el uso de órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas no tiene efecto en la humedad saturada para la estabilización de la subrasante; si  $F \leq 0.05$ , se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que implica que el uso de órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas si tiene efecto en la humedad saturada para la estabilización de la subrasante.

**Tabla 65**

*Análisis de varianza aplicado a la humedad saturada.*

<b>Rango de variación</b>	<b>GL</b>	<b><math>\Sigma</math> de cuadrado</b>	<b>Cuadrado de la media</b>	<b>Valor F</b>	<b>&gt; F</b>
Órganosilanos	3	67.082	22.361	0.738	0.558
Error	8	242.252	30.281		
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>309.334</b>			

Nota: Elaboración propia

En la tabla 65, a un 95% de confianza, se mantiene la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se rechaza la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que indica que el uso de órganosilanos como aditivo en el diseño de mezclas no tiene efecto en la humedad saturada para la estabilización de la subrasante.



#### 4.8. DISCUSIÓN

En el marco de esta investigación, se logra optimizar el comportamiento mecánico del suelo extraído (arcillas con alta y baja plasticidad), ya que la adición de órganosilanos en proporciones de 0.5, 1.0 y 1.5 l/m<sup>3</sup> consigue disminuir el índice de plasticidad hasta un 3% en comparación con el suelo original, aunque, por otra parte, Ramos, (2022), refieren que “la dosis de Terrasil óptima es de 1.4 l/m<sup>3</sup> en la estabilización de suelos arcillosos, ya que mejora las características del suelo, pasando de un suelo de plasticidad alta a un suelo de plasticidad media”.

Con respecto a la capacidad portante del suelo las muestras C-1, C-2 y C-3 tuvieron un valor de CBR menor al 6%, lo que implica que no es apto para la utilización de una subrasante; estudios realizados por Villanueva (2017), “refiere que la estabilización con 3 productos químicos: con una dosificación de 0.38 l/m<sup>3</sup> de poliacrilamida aniónica se logra elevar el CBR subrasante a 50.23%, con un 1.0 l/m<sup>3</sup> de órganosilano se logra elevar el CBR subrasante a 76.7%, con un 0.46 l/m<sup>3</sup> se logra elevar el CBR subrasante a 69.5%”, representando un aumento considerable en la resistencia del suelo”; en referencia a ello Martínez (2019), menciona que “a medida que se incrementa la dosificación del aditivo órganosilanos incrementa el CBR. Sin aditivos, el suelo registra un CBR de  $5.53 \pm 0.048\%$ , incrementándose a  $43.36 \pm 2.092\%$  al usar una concentración de órganosilanos de  $T3 = 1.5 \text{ l/m}^3$ ”. Sin embargo, Ramos (2022), en su investigación indica que “obtuvo un incremento en la capacidad de soporte llegando a un CBR de 6.6%, consiguiendo un incremento hasta en un 16.4% para una mezcla de 0.2-2.0 l/m<sup>3</sup>”.

De igual manera, el presente trabajo demuestra ver como favorece el aditivo órganosilano en la expansión. Donde se puede apreciar que la expansión en estado natural del suelo es de 5.10%, 4.11% y 4.52%, sin embargo, al añadir órganosilanos en



porcentajes de 0.5, 1.0, y 1.5 l/m<sup>3</sup> muestran una disminución en las deformaciones teniendo como resultados de 2.17%, 1.12% y 1.68% respectivamente, por su parte Martínez (2019), en su estudio menciona que “los niveles de aditivo órganosilanos sí influye sobre él % de expansividad de un suelo cohesivo, a mayor dosis de aditivo órganosilanos disminuye el % de expansividad, donde el testigo presenta una expansividad de 4.144 +/- 0.033%, en T1 su expansividad es de 2.724 +/- 0.028%, T2 su expansividad es de 1.133 +/- 0.037% y por ultimo T3 su expansividad es de 0.926 +/- 0.064%”, por otra parte, Ramos (2022), refiere que “para un suelos natural la expansión es de 6.25% disminuyendo al aumentar la dosificación del Terrasil de un 5.53% a 2.68% l/m<sup>3</sup>”.

Finalmente, el estudio indica cuales son los efectos que genera el aditivo órganosilanos en la permeabilidad de los suelos arcillosos, donde se ve que la permeabilidad en estado natural es de 2.981 E-04, 1.116E-04 y 1.028 E-04 cm/s sin embargo, al aumentar órganosilanos en porcentajes de 0.5, 1.0, y 1.5 l/m<sup>3</sup> muestran una variación de 5.550E-05, 2.623E-05 y 3.193 E-05 cm/s respectivamente, estudios realizados por Martínez (2019), indica que “el comportamiento de la permeabilidad se ve modificado por los niveles de órganosilanos, mostrando una disminución conforme se incrementa la dosis. En el testigo, la permeabilidad es de 2.31E-6 ± 7.70E-8 cm/s, mientras que en T1 baja a 1.80E-6 ± 2.70E-8 cm/s, en T2 llega a 1.23E-6 ± 2.50E-8 cm/s, y en T3 disminuye a 6.29E-7 ± 2.20E-8 cm/s”.



## V. CONCLUSIONES

**PRIMERA:** La incorporación de aditivos órganosilanos en suelos cohesivos ha demostrado un impacto significativo en la mejora de su estabilidad. Estos aditivos poseen la capacidad de transformar una subrasante inadecuada o deficiente en una subrasante de calidad buena, muy buena o incluso excelente, según la cantidad utilizada. Además, su uso reduce notablemente la permeabilidad y la tendencia expansiva del suelo, contribuyendo así a la durabilidad y eficiencia de las infraestructuras construidas sobre estos terrenos. En resumen, los órganosilanos se presentan como una solución eficaz y versátil para optimizar las propiedades de suelos cohesivos, mejorando su desempeño y fiabilidad en aplicaciones geotécnicas.

**SEGUNDA:** El empleo de aditivos órganosilanos influye directamente en el porcentaje de CBR (California Bearing Ratio) de los suelos. Se observa que, al aumentar la dosis de aditivo órganosilanos, también se incrementa el porcentaje de CBR. Específicamente, las dosificaciones de 0, 0.5, 1 y 1.5 ( $l/m^3$ ) muestran una mejora en el porcentaje de CBR con valores de 18.40%, 11.10% y 10.30% respectivamente a las calicatas C-1, C-2 y C-3. Este incremento transforma una subrasante insuficiente en una subrasante de calidad buena. Estos resultados evidencian la efectividad de los órganosilanos en mejorar la capacidad de soporte de suelos, lo que contribuye significativamente a la estabilidad y durabilidad de las infraestructuras construidas sobre dichos suelos.



**TERCERA:** La cantidad de aditivo órganosilanos utilizada tiene un impacto significativo en la reducción del porcentaje de expansividad de los suelos cohesivos. A medida que se incrementa la dosis del aditivo, se observa una disminución en el porcentaje de expansividad. Con dosificaciones de 0, 0.5, 1 y 1.5 l/m<sup>3</sup>, se evidencia una reducción en la expansividad del suelo de 2.17%, 1.12% y 1.68% con respecto a las calicatas C-1, C-2 y C-3 respectivamente. Estos resultados indican que los suelos tratados con mayores cantidades de aditivo órganosilanos presentan una menor expansión, lo que contribuye a una mayor estabilidad y durabilidad de las infraestructuras asentadas sobre estos suelos.

**CUARTA:** La cantidad de aditivo órganosilanos utilizada influye significativamente en la permeabilidad del suelo. A medida que se incrementa la dosis del aditivo, la permeabilidad del suelo disminuye. Específicamente, para dosificaciones de 0, 0.5, 1 y 1.5 l/m<sup>3</sup>, se observa una reducción en la permeabilidad de 5.550E-05, 2.623E-05 y 3.193E-05 con respecto a las calicatas C-1, C-2 y C-3 respectivamente. Estos resultados demuestran que los suelos tratados con mayores cantidades de aditivo órganosilanos presentan una menor permeabilidad, mejorando así su capacidad para soportar cargas y resistir la infiltración de agua, lo que contribuye a una mayor estabilidad y durabilidad de las infraestructuras construidas sobre estos suelos.

**QUINTA:** La dosis de aditivo órganosilanos influye significativamente en el índice de plasticidad (IP) del suelo tratado. A medida que se incrementa la cantidad del aditivo, Se constata una variación negativa en el índice de plasticidad. Con dosificaciones de 0, 0.5, 1 y 1.5 l/m<sup>3</sup>, el índice de



plasticidad disminuye de 2.63%, 31.75% y 23.61% respectivamente a las calicatas C-1, C-2 y C-3. Esta reducción en el índice de plasticidad mejora las propiedades del suelo, reduciendo su plasticidad de media a baja, lo que contribuye a una mayor estabilidad y mejor comportamiento mecánico del suelo tratado.

**SEXTA:** El tratamiento del suelo blando con aditivos órganosilanos resulta en un aumento significativo de la densidad seca. Con dosificaciones de 0, 0.5, 1 y 1.5 l/m<sup>3</sup>, la densidad seca se incrementa, 2.44g/cm<sup>3</sup>, 5.19 g/cm<sup>3</sup> y 5.34 g/cm<sup>3</sup> respecto a las calicatas C-1, C-2 y C-3 respectivamente. Este aumento en la densidad seca indica una mejora en la compactación del suelo, lo que contribuye a una mayor estabilidad y capacidad de soporte de las infraestructuras construidas sobre estos suelos tratados.

**SEPTIMA:** El uso de aditivos órganosilanos en los suelos no tiene un impacto significativo en la humedad saturada. Aunque se observa una reducción en la humedad conforme aumenta la dosificación de órganosilanos en las muestras C-1, C-2 y C-3, el análisis estadístico indica que las diferencias no son significativas. A pesar de la tendencia de reducción en la retención de agua, este efecto no es lo suficientemente relevante para mejorar la estabilización de la subrasante con un nivel de confianza del 95%.



## VI. RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** Se recomienda el uso de estabilizadores con aditivos órganosilanos en situaciones donde la subrasante presente suelos inadecuados. Este aditivo mejora significativamente las propiedades geotécnicas del suelo, haciéndolo más apto para su aplicación en obras viales. Su empleo puede transformar una subrasante deficiente en una base sólida y estable, contribuyendo así a la durabilidad y eficiencia de las infraestructuras viales.

**SEGUNDA:** Para la estabilización de suelos mediante el uso de aditivos órganosilanos, se recomienda que los suelos empleados estén libres de impurezas y no contengan más del 3% de su peso en materia orgánica. Este requisito es crucial para asegurar la efectividad del aditivo y garantizar la mejora deseada en las propiedades geotécnicas del suelo.

**TERCERA:** Se recomienda realizar investigaciones adicionales para explorar y comprender mejor las propiedades del aditivo órganosilanos, enfocándose en su aplicación en diversos tipos de suelos que también requieran estabilización. Estas investigaciones permitirán ampliar el conocimiento sobre su efectividad y optimizar su uso en una variedad de contextos geotécnicos.

**CUARTA:** Se recomienda realizar investigaciones adicionales para obtener una comprensión más completa de la estabilización de la subrasante. Específicamente, se sugiere explorar combinaciones como suelo con aditivo órganosilanos y cemento, así como suelo con aditivo órganosilanos y cal. Estos estudios pueden proporcionar información valiosa sobre la



sinergia entre estos materiales y su efecto en la mejora de las propiedades geotécnicas del suelo.

**QUINTA:** Se recomienda abstenerse de llevar a cabo trabajos de mejoramiento durante períodos de lluvia. La humedad adicional durante estas condiciones puede saturar el suelo, dificultando la adecuada filtración del aditivo órganosilanos. Para garantizar la efectividad del proceso de estabilización, es preferible realizar los trabajos en condiciones de suelo seco, lo que facilitará una distribución uniforme y una penetración óptima del aditivo en el suelo.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (MTC) Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras suelos geología, geotecnia y pavimentos sección suelos y pavimentos*. Servicios Gráficos Squadrito EIRL.
- (MTC) Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Lima, Perú.
- AASHTO. (1993). *Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento*. Asociación Estadounidense de Carreteras Estatales.
- ASTM Internacional. (1993). *ASTM D2487-93: Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS)*. ASTM International.
- ASTM Internacional. (1993). *ASTM D3282-93: Clasificación de suelos y mezclas y de suelo-agregado para fines de construcción de carreteras*. ASTM Internacional.
- ASTM Internacional. (2012). *ASTM D1557-12: Métodos de prueba estándar para las características de compactación del suelo en laboratorio utilizando un esfuerzo modificado (56 000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2700 kN-m/m<sup>3</sup>))*. ASTM Internacional.
- ASTM Internacional. (2017). *ASTM D6913M-17: Métodos de ensayo normalizados para granulometría (gradación) de suelos mediante análisis granulométrico*. ASTM Internacional.
- ASTM Internacional. (2021). *ASTM D7928-21: Método de prueba estándar para la distribución granulométrica (gradación) de suelos de grano fino mediante el análisis de sedimentación (hidrómetro)*. ASTM Internacional.
- Baptista Lucio, M., Fernández Collado, C., & Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill España. Obtenido de ISBN: 978-1-4562-2396-0
- Brem Environmental Solutions S.A.C. (s.f.). *Ficha técnica de aditivo estabilizador químico*. Obtenido de <http://brem.com.pe/index.html>
- Crespo Villalaz, C. (2007). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Limusa.





- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning Editores, S.A.
- Flores Quispe, A. A., & Mamani Quispe, W. O. (2022). *Estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante incorporando caucho granular de neumáticos en la carretera Cochiraya – Huayrapata Puno, 2022* [Tesis de título, Universidad César Vallejo]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/104635>
- Goicochea Posito, D. (2019). *Estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante con la aplicación de enzimas orgánicas, Chachapoyas, 2018* [Tesis de título, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14077/1799>
- Jara Hanco, J. A. (2024). *Estabilización de suelos arcillosos incorporando cenizas de madera (Aserrín), en su comportamiento mecánico - deformacional para el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las Gardenias de la ciudad de Juliaca* [Tesis de título, Universidad Nacional del Altiplano]. Obtenido de <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/21196>
- Jiménez Salas, J. A. (1990). *Hacia una mecánica de los suelos no saturados*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.
- Livise Berrio, J. V. (2023). *Estabilización química de suelo con cal para el mejoramiento de sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la carretera Puno - Mañazo* [Tesis de título, Universidad Nacional del Altiplano]. Obtenido de <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19456>
- Martinez Chavez, E. (2020). *Estabilización de suelos cohesivos con aditivo organosilanos a nivel de subrasante* [Tesis de título, Universidad Peruana los Andes]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12848/1366>
- Mejía Mejía, E., Novoa Ramírez, E., Ñaupas Paitán, H., & Villagómez Paucar, A. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis*. Ediciones de la U.
- Menéndez Acurio, J. R. (2009). *Ingeniería de Pavimentos - Materiales, Diseño y Conservación*. Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG).



- Montejo Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia, Ediciones y Publicaciones.
- Moreno Pérez, E. (2018). *Estabilización de suelos arcillosos con residuos de la construcción y demolición* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Obtenido de <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/2319>
- Nallamothu , M. D., & Achuthan , A. (2023). Estabilización de suelos expansivos con terrasil y fibra de coco como subrasante para pavimento. *EDP Sciences*, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101019>
- Patel, N. A., Mishra, C. B., & Pancholi, V. V. (Junio de 2015). *Estudio científico del uso del producto químico Terrasil para la estabilización del suelo*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/>.
- Ponce Crispín, D. K. (2017). *Uso del cloruro de calcio para estabilización de la subrasante en suelos arcillosos de la avenida Ccoripaccha - Puyhuan Grande – Huancavelica* [Tesis de título, Universidad Nacional de Huancavelica]. Obtenido de <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1414>
- Porter, O. J. (1938). *The preparation of subgrades* [Archivo PDF]. Obtenido de <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/18/18Part2-029.pdf>
- Ramos Quispe, F. N. (2022). *Nanotecnología aplicada a la estabilización de suelos para subrasante* [Tesis de título, Universidad Nacional del Altiplano]. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18869>
- Rodríguez Vinces, D. I. (2016). *Análisis comparativo de la compactación y humedad de la subrasante natural y la subrasante utilizando productos químicos biodegradables (Terrasil), de la vía ecológica del Cantón Quevedo, Provincia de los Ríos* [Tesis de título, Universidad Técnica de Ambato]. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23558>
- Ruano López, D. R. (2012). *Estabilización de suelos cohesivos por medio de arenas volcánicas y cal viva* [Tesis de título no publicada]. Universidad de San Carlos de Guatemala.



- Sagüés, P. (2008). *Propiedades de los suelos compactados* [Archivo PDF]. Obtenido de <https://www.academia.edu/download/57878083/Compactacion.pdf>
- Terzaghi , K., & Peck, R. B. (1963). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. El ateneo S.A.
- Villanueva Flores, S. M. (2017). *Propuesta de estabilización de carreteras de bajo volumen de tránsito en la sierra, sobre los 2000 m.s.n.m, utilizando poliacrilamida aniónica, organosilano y un sulfonato* [Tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14138/1672>
- Vivar Romero, G. (1991). *Diseño y construcción de pavimentos*. Colegio de Ingenieros del Peru, Capitulo de Ingenieria Civil, Consejo Departamental de Lima.
- Zapana Bustincio, R. A. (2022). *Estabilización de suelos arcillosos con polímeros reciclados a nivel de la subrasante de la carretera que une el C.P. de Santa María con la av. Circunvalación del distrito de San Miguel - San Román - Puno* [Tesis de título, Universidad Continental]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12316>
- Zydex. (s.f.). Bases de suelo fuertes, resistentes al agua y flexibles. Recuperado el 01 de Octubre de 2024, de <https://zydexgroup.com/us/>



## ANEXOS

**ANEXO 1:** Declaración jurada de autenticidad de tesis

**ANEXO 2:** Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional

**ANEXO 3:** Matriz de consistencia

**ANEXO 4:** Constancia del uso de equipos de laboratorio

**ANEXO 5:** Resultado de los ensayos

**ANEXO 6:** Ficha técnica del agente estabilizador químico órganosilanos – empresa  
zydex

**ANEXO 7:** Fichas técnicas del agente estabilizador químico órganosilanos – empresa  
Brem s.a.c. Environmental Solutions

**ANEXO 8:** Ficha de datos de seguridad – aditivo órganosilano

**ANEXO 9:** Evidencias fotográficas

**ANEXO 10:** Plano de ubicación de calicatas



## ANEXO 1: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



VRI  
Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Cristian Uector Chavez Aza  
identificado con DNI 72605691 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Civil

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Estabilización de suelos arcillosos utilizando el  
aditivo organosilanos a nivel de subrasante en la pista  
de salida Cusco - Juliaca, 2023"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 05 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 2: Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Cristian Victor Chavez Aza identificado con DNI 72605691 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Civil  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" Estabilización de suelos arcillosos utilizando el aditivo ósmosilanos a nivel de subsanste en la pista de salida Cusco - Juliaca, 2023 "

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

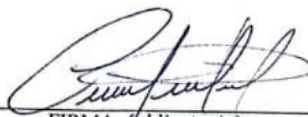
En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 05 de diciembre del 2024

  
FIRMA (obligatoria)



Huella