



**UNIVERSIDAD NACIONAL**

**TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PARA OBTENER**

**EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO CIVIL**

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS A NIVEL DE  
SUBRASANTE CON LA APLICACIÓN DE ENZIMAS  
ORGÁNICAS, CHACHAPOYAS, 2018.**

**AUTOR: Bach. Darwin Goicochea Posito**

**ASESOR: Ing. Manuel Eduardo Aguilar Rojas**

**CHACHAPOYAS – PERÚ**

**2019**



**UNIVERSIDAD NACIONAL**

**TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PARA OBTENER**

**EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO CIVIL**

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS A NIVEL DE  
SUBRASANTE CON LA APLICACIÓN DE ENZIMAS  
ORGÁNICAS, CHACHAPOYAS, 2018.**

**AUTOR: Bach. Darwin Goicochea Posito**

**ASESOR: Ing. Manuel Eduardo Aguilar Rojas**

**CHACHAPOYAS – PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo de investigación va dedicado de manera muy especial a mis padres María Isabel Posito Marín Y Lucio Goicochea Ruíz por el sacrificio y apoyo incondicional para culminar mi carrera profesional, y a mis hermanos María Elita Goicochea Pósito y Gilmer Goicochea Pósito por brindarme ese apoyo incondicional y ejemplo de superación.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Le doy gracias mi madre María Isabel Pósito Marín, por estar conmigo en cada paso que doy, inculcándome valores y el ánimo para superarme como persona y como profesional, por todo ese amor brindado y sobre todo por ser el ejemplo para mi vida.*

*Le doy las gracias a mi padre Lucio Goicochea Ruíz, por nunca rendirse en brindarme su apoyo incondicional para lograr terminar mi carrera profesional, espero estés orgulloso de mi.*

*A mis hermanos María Elita Goicochea y Gilmer Goicochea, personas fundamentales de todos mis logros al brindarme su apoyo y amor desinteresado,*

*A Rocío López, quien con su apoyo, paciencia y amor brindado supo impulsarme en todo momento.*

*Al ingeniero Manuel Eduardo Aguilar Rojas, por haberme asesorado en el desarrollo de esta investigación.*

*Gracias a mis amigos y familiares por ser parte de mi vida y brindarme su apoyo en toda mi etapa de formación profesional.*

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE  
MENDOZA DE AMAZONAS**

Dr. Policarpio Chauca Valqui

**RECTOR**

Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

**VICERRECTOR ACADÉMICO**

Dra. Flor Teresa García Huamán

**VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN**

M. Sc. Edwin Adolfo Díaz Ortiz

**DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CIVIL Y AMBIENTAL**

### **VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS**

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que ha asesorado la tesis titulada “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS A NIVEL DE SUBRASANTE CON LA APLICACIÓN DE ENZIMAS ORGÁNICAS, CHACHAPOYAS, 2018”, El tesista egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Civil.

- Bach. Darwin Goicochea Posito

El suscrito da el visto bueno de la mencionada tesis dándole pase para que sea sometida a la revisión por el jurado evaluador comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones que formulen para su posterior sustentación.

Chachapoyas, 6 de agosto de 2019.



---

Ing. Manuel Eduardo Aguilar Rojas

**ASESOR**

**JURADO DE TESIS**



---

M. Sc. Edwin Adolfo Díaz Ortiz

**PRESIDENTE**



---

Lic. José Luis Quispe Osorio

**SECRETARIO**



---

Arq. Guillermo Arturo Díaz Jáuregui

**VOCAL**

## DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO

Yo, DARWIN GOICOCHEA POSITO, identificado con DNI N° 71096618, bachiller de la escuela profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor de la tesis titulada:  
“ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS A NIVEL DE SUBRASANTE CON LA APLICACIÓN DE ENZIMAS ORGÁNICAS, CHACHAPOYAS, 2018” la misma que se presentó para optar EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. De identificarse fraude, piratea, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias, sanciones civiles y penales que de mi acción se deriven.

Chachapoyas, 6 de agosto de 2019



---

Darwin Goicochea Posito

DNI N° 71096618



**ANEXO 2-N**

**ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS**

En la ciudad de Chachapoyas, el día 26 de Agosto del año 2019, siendo las 5:30pm horas, el aspirante: Darwin Goicochea Posito defiende públicamente la tesis titulada: Estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante con la aplicación de enzimas orgánicas, Chachapoyas, 2018

para optar el Título Profesional Ingeniero Civil, otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el Jurado, constituido por: Presidente: Edwin Adolfo Díaz Ortiz, M.Sc. Ing  
Secretario: José Luis Quispe Osorio, Lic.  
Vocal: Guillermo Arturo Díaz Jantepui, M.Sc. Arq.



Procedió el (los) aspirante (s) a hacer la exposición de los antecedentes, contenido de la tesis y conclusiones obtenidas de la misma, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la tesis presentada, los miembros del jurado pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones u objeciones consideran oportunas, las cuales fueron contestadas por el los aspirante (s).  
Tras la intervención de los miembros del jurado y las oportunas contestaciones del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los miembros del jurado presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.  
Seguidamente, a puerta cerrada, el jurado determinará la calificación global concedida a la tesis, en términos de:

Notable o sobresaliente ( )      Aprobado (  )      No apto ( )

Otorgada la calificación el presidente del Jurado comunica, en sesión pública, la calificación concedida. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 6:45pm horas del mismo día, el jurado concluye el acto de sustentación de la tesis.

\_\_\_\_\_  
SECRETARIO

\_\_\_\_\_  
VOCAL

\_\_\_\_\_  
PRESIDENTE

OBSERVACIONES: .....

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS .....	v
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS .....	vi
JURADO DE TESIS .....	vii
DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO.....	viii
ÍNDICE GENERAL.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>II. MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>17</b>
2.1. LOCALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
2.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
2.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO.....	18
2.4. MÉTODOS.....	18
2.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	18
2.6. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO.....	19
2.6.1. Fase preliminar .....	19
Exploración de campo.....	19
Toma de muestras del suelo .....	19
Preparación de la muestra .....	19
2.6.2. Fase experimental .....	20
Límites de Atterberg .....	20
Análisis granulométrico por tamizado ASTM D-422, MTC E 107.....	21
Clasificación SUCS ASTM D-2487 .....	21

Clasificación AASHTO M-145.....	22
Proctor modificado ASTM D-1557, MTC E 115 .....	22
California Bearing Ratio (CBR) ASTM D-1883, MTC E 132.....	23
2.6.3. Fase de gabinete.....	23
Procesamiento y análisis de datos .....	23
<b>III. RESULTADOS .....</b>	<b>24</b>
3.1. DETALLE DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO .....	25
3.1.1. Límites de Atterberg.....	25
3.1.2. Proctor modificado .....	28
3.1.3. California Bearing Ratio (CBR).....	30
3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	31
3.2.1. Análisis de varianza.....	31
3.2.1.1. Límite líquido (LL) .....	33
3.2.1.2. Límite plástico (LP) .....	35
3.2.1.3. Índice de plasticidad (IP) .....	36
3.2.1.4. Máxima densidad seca (MDS).....	38
3.2.1.5. Óptimo contenido de humedad (OCH) .....	39
3.2.1.6. California Bearing Ratio (CBR).....	41
<b>IV. DISCUSIÓN.....</b>	<b>44</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>46</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>49</b>
ANEXO 1. PANEL FOTOGRÁFICO .....	49
ANEXO 2. TABLAS DE INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	51
ANEXO 3. TABLA T-STUDENT PARA EL ANÁLISIS DMS.....	55
ANEXO 4. TABLA DE CUANTILES DE LA DISTRIBUCIÓN F PARA EL ANOVA.....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Coordenadas UTM de calicata .....	17
<b>Tabla 2.</b> Resumen de ensayos de laboratorio.....	24
<b>Tabla 3.</b> Limite liquido por repetición .....	25
<b>Tabla 4.</b> Limite plástico por repetición.....	26
<b>Tabla 5.</b> Índice de plasticidad por repetición.....	27
<b>Tabla 6.</b> Máxima densidad seca (MDS) por repetición .....	28
<b>Tabla 7.</b> Óptimo contenido de humedad (OCH).....	29
<b>Tabla 8.</b> California Bearing Ratio (CBR).....	30
<b>Tabla 9.</b> Matriz base para el análisis de varianza .....	32
<b>Tabla 10.</b> Análisis de varianza para límite líquido .....	33
<b>Tabla 11.</b> Diferencia minina significativa (DMS) para limite liquido .....	33
<b>Tabla 12.</b> Prueba de comparación de medias diferentes para límite líquido .....	34
<b>Tabla 13.</b> Análisis de varianza para límite plástico .....	35
<b>Tabla 14.</b> Diferencia minina significativa (DMS) para límite plástico .....	35
<b>Tabla 15.</b> Análisis de varianza para índice de plasticidad .....	36
<b>Tabla 16.</b> Diferencia minina significativa (DMS) para índice de plasticidad .....	36
<b>Tabla 17.</b> Prueba de comparación de medias diferentes para índice de plasticidad.....	37
<b>Tabla 18.</b> Análisis de varianza para máxima densidad seca.....	38
<b>Tabla 19.</b> Diferencia minina significativa (DMS) para máxima densidad seca .....	39
<b>Tabla 20.</b> Análisis de varianza para óptimo contenido de humedad .....	39
<b>Tabla 21.</b> Diferencia minina significativa (DMS) para óptimo contenido de humedad.....	40
<b>Tabla 22.</b> Prueba de comparación de medias diferentes para OCH .....	41
<b>Tabla 23.</b> Análisis de varianza para california Bearing Ratio .....	41
<b>Tabla 24.</b> Diferencia minina significativa (DMS) para california Bearing Ratio .....	42
<b>Tabla 25.</b> Prueba de comparación de medias diferentes para California Bearing Ratio ....	43
<b>Tabla 26.</b> Numero de calicatas para exploración de suelos .....	51
<b>Tabla 27.</b> Clasificación de los suelos según índice de plasticidad .....	52
<b>Tabla 28.</b> Clasificación de los suelos según tamaño de partículas .....	52
<b>Tabla 29.</b> Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).....	53
<b>Tabla 30.</b> Sistema de clasificación AASHTO .....	54
<b>Tabla 31.</b> Categorías de sub rasante CBR .....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de calicata carretera desvío Pucacruz .....	17
<b>Figura 2.</b> Límite líquido por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas ..	25
<b>Figura 3.</b> Límite plástico por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas ..	26
<b>Figura 4.</b> Límite plástico por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas ..	27
<b>Figura 5.</b> Máxima densidad seca (MDS) por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas.....	28
<b>Figura 6.</b> Óptimo contenido de humedad por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas.....	29
<b>Figura 7.</b> California Bearing Ratio (CBR) por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas.....	30
<b>Figura 8.</b> Interpretación de DMS para LL.....	34
<b>Figura 9.</b> Interpretación de DMS para IP .....	38
<b>Figura 10.</b> Interpretación de DMS para OCH .....	41
<b>Figura 11.</b> Interpretación de DMS para CBR.....	43
<b>Figura 12.</b> Obtención de la muestra de suelo arcillosos mediante una calicata .....	49
<b>Figura 13.</b> Secado y disgregado de la muestra .....	49
<b>Figura 14.</b> Adición de las enzimas orgánicas .....	49
<b>Figura 15.</b> Análisis granulométrico .....	50
<b>Figura 16.</b> Límites de consistencia .....	50

## RESUMEN

La presente investigación de tipo experimental, tuvo como objetivo determinar las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos a nivel de subrasante con la adición de enzimas orgánicas. La carretera desvío Pucacruz en la ciudad de Chachapoyas, presenta una subrasante inadecuada, teniendo un tipo de suelo limo arcilloso a nivel de subrasante, evidenciando problemas para estabilizarlos y usarlos como subrasante de una estructura de pavimento. Se analizó las propiedades físicas y mecánicas del suelo y se constituyeron muestras, y como agente estabilizante las enzimas orgánicas en proporciones de 1/1000, 1/900 y 1/800. Los resultados de los ensayos de laboratorio, para determinar las propiedades físicas fueron la granulometría y límites de Atterberg, y para las propiedades mecánicas, el proctor modificado y California Bearing Ratio, nos evidenció que estas adiciones no presentan mayor incremento de las características físicas y mecánicas, siendo así suelos que no cumplen con las normas estipuladas por el MTC para la fundación de pavimentos, al ser suelos de clasificación limo arcillosos con un índice de grupo  $IG < 9$  y un  $CBR < 6 \%$  que indica una subrasante inadecuada. La dosis que presentó mayor incremento en el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo fue la de 1/900, este resultado se obtuvo mediante el análisis estadístico, utilizando la prueba de comparaciones múltiples diferencia mínima significativa de Fisher (DMS).

***Palabras clave:** propiedades físico-mecánicas, subrasante, enzimas orgánicas, estabilización.*

## ABSTRACT

The purpose of this experimental investigation was to determine the physical and mechanical properties of clay soils at the subgrade level with the addition of organic enzymes. The Pucacruz detour road in the city of Chachapoyas, presents an inadequate subgrade, having a type of clay silt soil at the subgrade level, showing problems to stabilize them and use them as a subgrade of a pavement structure. The physical and mechanical properties of the soil were analyzed and samples were constituted, and as organic stabilizing agent in proportions of 1/1000, 1/900 and 1/800. The results of the laboratory tests, to determine the physical properties were the granulometry and limits of Atterberg, and for the mechanical properties, the modified proctor and California Bearing Ratio, showed us that these additions do not show a greater increase in the physical and mechanical characteristics, thus being soils that do not comply with the standards stipulated by the MTC for the foundation of pavements, being soils of silt clay classification with a group index  $IG < 9$  and a CBR  $< 6\%$  that indicates an inadequate subgrade. The dose that presented greater increase in the behavior of the physical and mechanical properties of the soil was that of 1/900, this result was obtained by means of statistical analysis, using the Fisher's test of multiple comparisons significant minimum difference (DMS).

**Keywords:** *physical-mechanical properties, subgrade, organic enzymes, stabilization.*

## **I. INTRODUCCIÓN**

El crecimiento social y económico de una región se debe principalmente a sus vías de comunicación, a través de ellas se dan las relaciones comerciales, sociales, culturales, etc.; pero el gasto económico que demanda la construcción de caminos y carreteras es alto, a esto se le deben sumar los gastos por mantenimiento, reparación y rehabilitación que se les hacen cada cierto período. (Quispe, 2015, pág. xxiii)

La conformación de un pavimento efectivo depende fundamentalmente del suelo de subrasante, por esta razón el desarrollo de la investigación de estabilización de suelo arcillosos de la sub rasante con la adición de enzimas orgánicas, especialmente en suelos de la ciudad de Chachapoyas que presenta suelos arcillosos de alta plasticidad, las cuales son desfavorables para la estructura de sus pavimentos, causando distintas fallas, como asentamientos, fisuras, deslizamientos, trayendo consigo costos elevados. (Quispe, 2015)

En la actualidad las nuevas tecnologías nos permiten la construcción de las carreteras para una extensa vida útil y a la vez el logro de un considerable ahorro en cuanto a los posteriores gastos de mantenimiento y rehabilitación. Una alternativa muy útil, es la construcción de carreteras con la utilización de estabilizadores químicos como las enzimas orgánicas, pues es simple y de bajo costo, además da como resultado vías estables de larga vida útil que requieren menos mantenimiento. Estos productos mejoran las propiedades físicas y mecánicas de las diferentes capas de la estructura del pavimento (subrasante, subbase y base) con un incremento en la densidad de compactación, capacidad portante, y su vida útil. (Ravines, 2010, pág. 1)

La presente investigación pretende estabilizar los suelos limo arcillosos de la carretera desvío Pucacruz, a nivel de subrasante, mejorando sus propiedades físicas y mecánicas con adición de enzimas orgánicas; para ello, se desarrolló como metódica desde la selección de la muestra a la que se le agregó dosis diferentes de enzimas orgánicas, para estudiar estadísticamente cuál de ellos presenta mejora de sus características físicas y mecánicas, teniendo a la concentración 1/900 como la que mejores resultados dieron, sin embargo, no deja de ser una subrasante pobre o inadecuada.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Localización de la investigación

La investigación se realizó en la carretera desvío Pucacruz en la ciudad de Chachapoyas, aplicando la técnica de muestreo, la cual incluyó la excavación de una calicata de 1.50 metros de profundidad, teniendo como nivel superior la línea de subrasante.



**Figura 1.** Ubicación de calicata carretera desvío Pucacruz

**Tabla 1.** Coordenadas UTM de calicata

Lugar	Este	Norte	Altitud (msnm)
Carretera desvío Pucacruz	181558	9308995	2241

Los ensayos de laboratorio concernientes de mecánica de suelos y la adición del aditivo enzimas orgánicas se realizaron en los laboratorios “Diaz & Ocampo Constructores y Consultores S.R.L.” ubicado en el distrito de chachapoyas, provincia Chachapoyas, departamento de Amazonas.

## **2.2. Diseño de la investigación**

La investigación es del tipo experimental con un diseño completamente al azar.

Variable independiente: Enzimas orgánicas.

Variable dependiente: Estabilización de suelos arcillosos.

## **2.3. Población, muestra y muestreo.**

### **Universo muestral**

El universo muestral lo constituyen los suelos limo arcillosos de la carretera desvío Pucacruz de la ciudad de Chachapoyas.

### **Muestreo**

Se realizó con la técnica de muestreo no probabilístico tipo intencional o por juicio del investigador, la cual incluyó, de acuerdo a la tabla 26 que se muestra en los anexos, la ejecución de una calicata de 1.50 metros de profundidad, teniendo como nivel superior la línea de subrasante.

## **2.4. Métodos**

### **Inductivo**

Se inició con la observación de casos particulares para obtener conclusiones generales, analizando la adición de enzimas orgánicas a suelos limo arcillosos de la subrasante, mediante ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, para luego ser analizados estadísticamente usando el análisis de varianza con un diseño completamente al azar, y para determinar cuál de las proporciones tiene mayor incidencia en las propiedades físicas y mecánicas del suelo, se utilizó la prueba diferencia mínima significativa de Fisher (DMS).

## **2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **❖ Técnicas**

- Observación directa
- Exploración de suelos mediante la ejecución de calicatas.

### **❖ instrumentos**

- Ficha técnica de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.

## **2.6. Metodología y procedimiento**

Se localizó el área de estudio, para luego obtener muestras representativas del suelo, mediante la ejecución de calicatas, de las cuales se realizaron los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos con la adición de distintas proporciones de enzimas orgánicas, para finalmente realizar el análisis de resultados, se utilizó el método estadístico análisis de varianza con un diseño completamente al azar, utilizando la prueba diferencia mínima significativa de Fisher (DMS), para determinar cuál de las proporciones adicionadas presenta mayor incidencia de las características del suelo en estudio.

### **2.6.1. Fase preliminar**

#### **Exploración de campo**

Se seleccionó la carretera Desvío Pucacruz por juicio del investigador, teniendo en cuenta, mediante observación directa, el suelo arcilloso que presentaba en la subrasante, así como también, las facilidades para la excavación de la calicata de exploración.

Se ubico la calicata como se muestra en la figura 1, ya que presenta suelos que caracteriza a todo el tramo de la carretera, siendo también el centro de la longitud de esta.

#### **Toma de muestras del suelo**

La toma de muestras de suelo se realizó mediante una calicata de la cual se obtendrá las muestras representativas para efectuar los ensayos de laboratorio correspondientes.

La excavación de la calicata se realizó en un día soleado, tomando las precauciones para no contaminar la muestra con otro tipo de material o alterarla, se tomó las precauciones pertinentes para no ocasionar accidente alguno.

#### **Preparación de la muestra**

La preparación de la muestra comprende operaciones de secado, el cual se realizó al sol en campo abierto; disgregado, se efectuó la disgregación de los grumos con la ayuda de un mazo de metal; el cuarteo se realizó

manualmente, separando 30 kg de suelo para cada proporción de enzimas orgánicas.

Las proporciones de enzimas orgánicas añadidas a las muestras son: 1/1000; 1/900; 1/800. Se tomo como base la proporción de las especificaciones técnicas del producto 1/1000.

Como las proporciones de enzimas orgánicas son relativamente pequeñas, la adición del aditivo se realiza en una muestra patrón de suelo de 30 kg para cada proporción de las cuales se realizan todos los ensayos de laboratorio correspondientes.

COMBINACIÓN 1: 1/1000

$$\frac{1}{1000} * 30000g = 30.00g$$

30.00 gramos es la cantidad de enzimas orgánicas para un total de 30 kg de suelo limo arcilloso.

COMBINACIÓN 1: 1/900

$$\frac{1}{900} * 30000g = 33.33g$$

33.33 gramos es la cantidad de enzimas orgánicas para un total de 30 kg de suelo limo arcilloso.

COMBINACIÓN 1: 1/800

$$\frac{1}{800} * 30000g = 37.50g$$

37.50 gramos es la cantidad de enzimas orgánicas para un total de 30 kg de suelo limo arcilloso.

## **2.6.2. Fase experimental**

### **Límites de Atterberg**

Los límites de Atterberg establecen cuan sensible es el comportamiento de un suelo en relación con su contenido de humedad (...), estos límites de Atterberg que miden la cohesión del suelo son: el límite líquido (LL, según ensayo MTC E 110), el límite plástico (LP, según ensayo MTC E 111), el límite de contracción (LC, según ensayo MTC E 112). (MTC, 2014, pág. 26)

Límite líquido ASTM D-4318, MTC E 110

“Es el contenido de humedad, expresado en porcentaje, para el cual el suelo se halla en el límite entre los estados líquido y plástico”. (MTC, 2016, pág. 67)

Límite plástico ASTM D-4318, MTC E 111

“Se denomina límite plástico a la humedad cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe.” (MTC, 2014, pág. 26)

Índice de plasticidad

El índice de plasticidad indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica y permite clasificar bastante bien un suelo. Un IP grande corresponde a un suelo muy arcilloso; por el contrario, un IP pequeño es característico de un suelo poco arcilloso. (MTC, 2014, pág. 26). Como se muestra en los anexos en la tabla 27.

**Análisis granulométrico por tamizado ASTM D-422, MTC E 107.**

El análisis granulométrico de un suelo tiene por finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función a su tamaño (MTC, 2014, pág. 25), como se muestra en los anexos en la tabla 28. Clasificación de los suelos según tamaño de las partículas.

**Clasificación SUCS ASTM D-2487**

Este sistema tiene la ventaja de aclarar mejor las propiedades del suelo y su respectiva descripción; SUCS clasifica los suelos según su textura y plasticidad; divide las categorías en suelo fino y suelo grueso, como se muestra en la tabla 29 de los anexos; tomando en cuenta los límites de Atterberg y la granulometría del suelo. (Ravines, 2010, pág. 30)

### **Clasificación AASHTO M-145**

Este sistema se desarrolló en 1929, y lo usan principalmente los departamentos de carreteras. De acuerdo con este sistema, el suelo se clasifica en siete grupos, como se muestra en la tabla 30 de los anexos, del A1 al A7, según los siguientes criterios:

- Tamaño de la partícula:

Grava: fracción que pasa la malla de 75 mm y es retenida en la malla < N° 10 (2 mm).

Arena: fracción que pasa la malla N° 10 y es retenida por la malla N° 200 (0.075 mm)

Limo y arcilla: fracción que pasa la malla N° 200.

- Plasticidad:

El termino limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menos.

El termino arcillosos se utiliza cuando las fracciones de finos tienen un índice de plasticidad de 11 o mayor. (Díaz, 2014, pág. 50)

### **Proctor modificado ASTM D-1557, MTC E 115**

Este ensayo abarca los procedimientos de compactación usados en laboratorio, para determinar la relación entre el contenido de agua y peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 101,6 ó 152,4 mm (4 ó 6 pulg) de diámetro con un pisón de 44,5 N (10 lbf) que cae de una altura de 457 mm (18 pulg), produciendo una energía de compactación de (2700 kN-m/m<sup>3</sup> (56000 pie-lbf/pie<sup>3</sup>)). Este ensayo se aplica solo para suelos que tienen 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de 19,0 mm (¾" pulg). (MTC, 2016, pág. 105)

### **California Bearing Ratio (CBR) ASTM D-1883, MTC E 132**

Describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado valor de la relación de soporte, que es muy conocido, como CBR (California Bearing Ratio). El ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad; pero también puede operarse en forma análoga sobre muestras inalteradas tomadas del terreno. (MTC, 2016, pág. 248)

Una vez que se haya clasificado los suelos por el sistema AASHTO y SUCS, se elabora un perfil estratigráfico para cada sector homogéneo o tramo en estudio, a partir del cual se determinara el programa de ensayos para establecer el CBR que es el valor soporte o resistencia del suelo, que estará referido al 95% de la MDS (máxima densidad seca) y a una penetración de carga de 2.54 mm (MTC, 2014, pág. 29), las categorías de subrasante según el CBR se muestra en los anexos en la tabla 31.

#### **2.6.3. Fase de gabinete**

##### **Procesamiento y análisis de datos**

Se utilizó el método estadístico análisis de varianza con un diseño completamente al azar, utilizando la prueba de comparaciones múltiples diferencia mínima significativa de Fisher (DMS), para determinar cuál de las proporciones adicionales presenta mayor incidencia de las características del suelo en estudio.

### III. RESULTADOS

Tabla 2. Resumen de ensayos de laboratorio

ENSAYO	CONCENTRACIONES APLICADAS	REPETICIONES				
		1	2	3	4	5
LÍMITE LÍQUIDO (LL)	Sin adición	53.30	54.00	53.30	53.00	52.50
	1/800	51.70	52.20	52.70	52.10	51.50
	1/900	52.70	50.00	49.60	49.80	51.60
	1/1000	51.20	49.30	49.50	49.80	50.90
LÍMITE PLÁSTICO (LP)	Sin adición	30.86	30.40	31.80	30.60	30.60
	1/800	32.58	29.90	31.10	29.50	32.00
	1/900	30.97	29.60	30.20	30.40	30.90
	1/1000	30.98	30.20	30.00	29.60	31.00
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	Sin adición	22.44	23.60	21.50	22.40	21.90
	1/800	19.12	22.30	21.60	22.60	19.50
	1/900	21.73	20.40	19.40	19.40	20.70
	1/1000	20.22	19.10	19.50	20.20	19.90
MÁXIMA DENSIDAD SECA (MDS)	Sin adición	1.778	1.799	1.805	1.805	1.779
	1/800	1.789	1.805	1.809	1.813	1.813
	1/900	1.790	1.817	1.827	1.821	1.819
	1/1000	1.785	1.801	1.809	1.817	1.815
ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (OCH)	Sin adición	16.77	15.20	15.50	15.90	16.20
	1/800	16.09	14.90	15.00	15.40	15.40
	1/900	14.81	14.00	13.70	14.10	14.70
	1/1000	15.83	15.00	14.70	14.50	15.20
CBR	Sin adición	2.4	2.4	2.6	2.9	2.9
	1/800	2.8	2.6	3.2	3.3	3.3
	1/900	3.3	3.6	4.3	4.5	4.0
	1/1000	2.4	2.9	3.6	3.3	3.4

### 3.1. Detalle de resultados de ensayos de laboratorio

#### 3.1.1. Límites de Atterberg

##### Límite líquido

Tabla 3. Límite líquido por repetición

ENZIMAS ORGÁNICAS (%)	REPETICIONES				
	1	2	3	4	5
0%	53.30	54.00	53.30	53.00	52.50
1/800	51.70	52.20	52.70	52.10	51.50
1/900	52.70	50.00	49.60	49.80	51.60
1/1000	51.20	49.30	49.50	49.80	50.90

La tabla 3 muestra los resultados de límite líquido obtenidos por cada concentración de enzimas orgánicas aplicadas para cada una de las cinco repeticiones realizadas en el laboratorio.

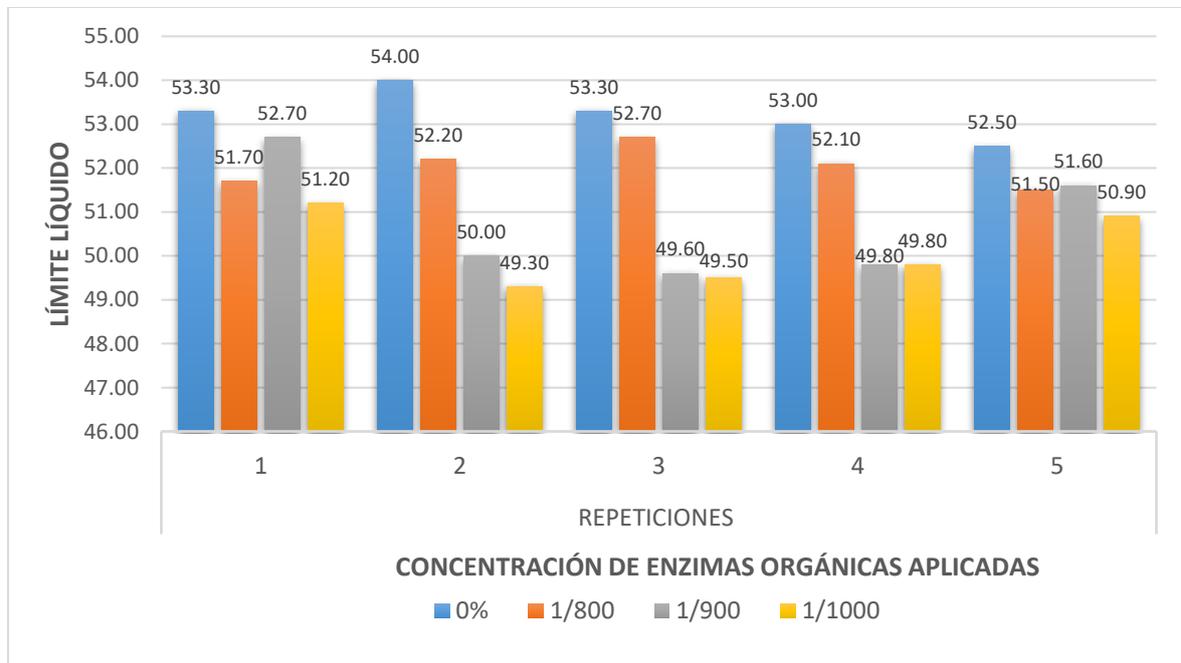


Figura 2. Límite líquido por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas

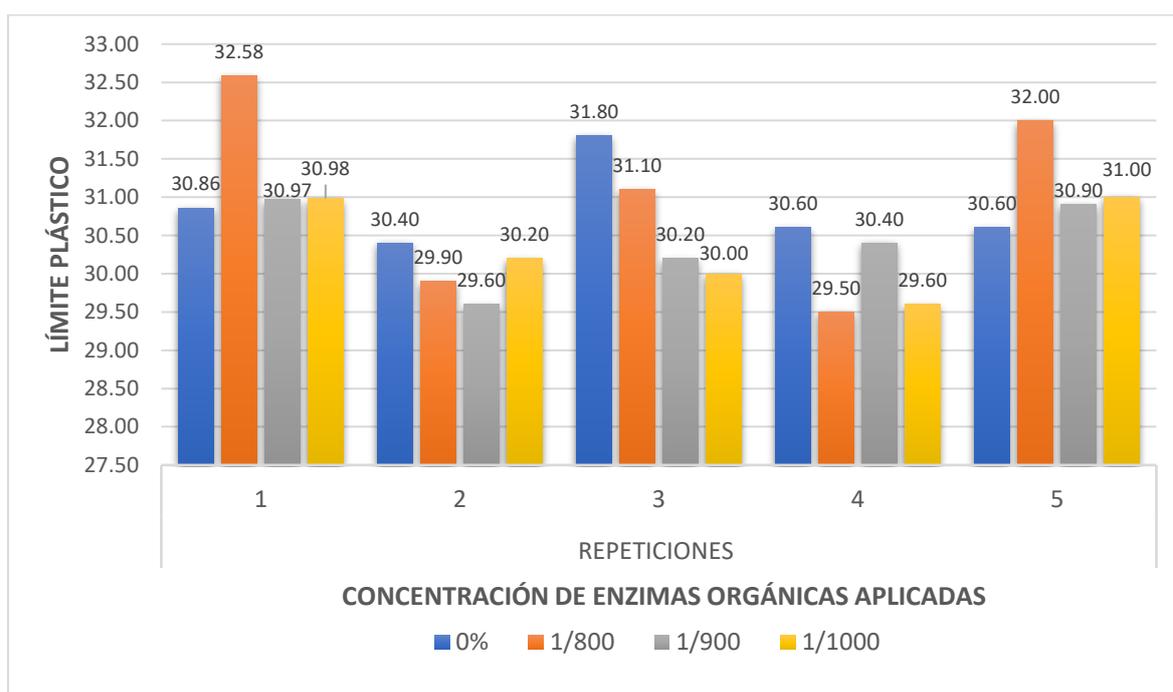
En la figura 2 se puede observar la tendencia, que a más concentración de enzimas orgánicas aplicada el límite líquido va subiendo su valor.

## Límite plástico

**Tabla 4.** Limite plástico por repetición

ENZIMAS ORGÁNICAS (%)	REPETICIONES				
	1	2	3	4	5
0%	30.86	30.40	31.80	30.60	30.60
1/800	32.58	29.90	31.10	29.50	32.00
1/900	30.97	29.60	30.20	30.40	30.90
1/1000	30.98	30.20	30.00	29.60	31.00

La tabla 4 muestra los resultados de límite plástico obtenidos por cada concentración de enzimas orgánicas aplicadas para cada una de las cinco repeticiones realizadas en el laboratorio.



**Figura 3.** Límite plástico por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas

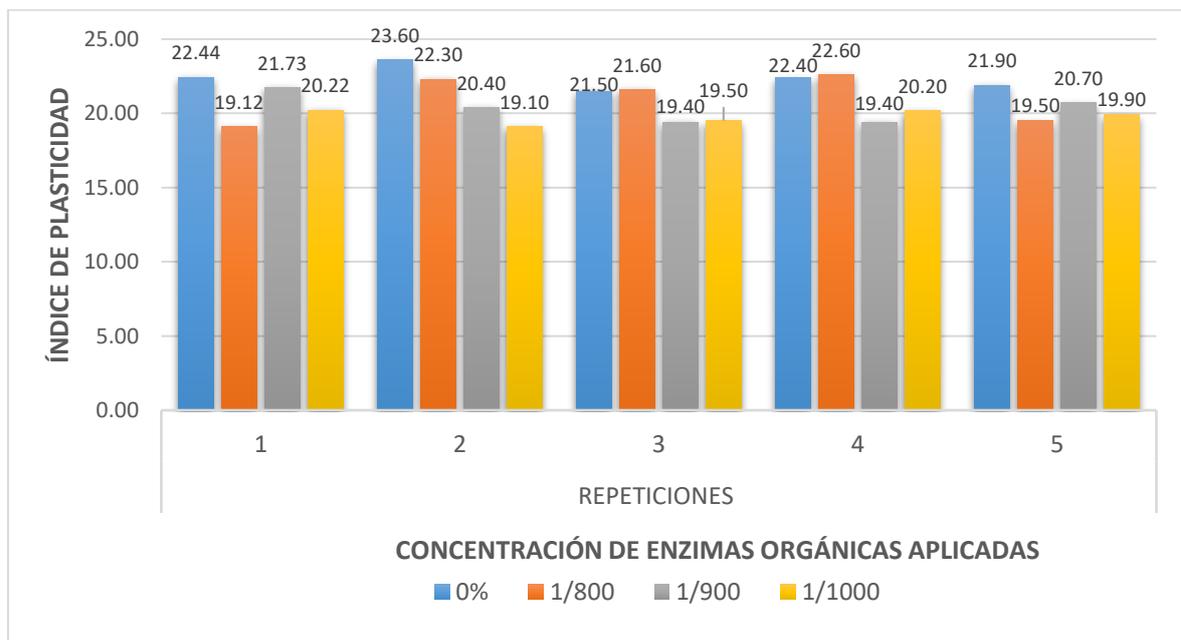
En la figura 3 se puede evidenciar que no todas las concentraciones de enzimas orgánicas aplicadas tienen una reacción favorable para el límite plástico.

## Índice de plasticidad

**Tabla 5.** Índice de plasticidad por repetición

ENZIMAS ORGÁNICAS (%)	REPETICIONES				
	1	2	3	4	5
0%	22.44	23.60	21.50	22.40	21.90
1/800	19.12	22.30	21.60	22.60	19.50
1/900	21.73	20.40	19.40	19.40	20.70
1/1000	20.22	19.10	19.50	20.20	19.90

La tabla 5 muestra los resultados de índice de plasticidad, la cual es una característica que se define como la diferencia entre el LL y LP, obtenidos por cada concentración de enzimas orgánicas aplicadas para cada una de las cinco repeticiones realizadas en el laboratorio.



**Figura 4.** Límite plástico por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas

En la figura 4 se puede evidenciar que las concentraciones de enzimas orgánicas aplicadas presentan una tendencia a mejorar la plasticidad del suelo en estudio, que en algunos casos van de una plasticidad alta ( $IP > 20$ ), que representan a suelos muy arcillosos, a una plasticidad media ( $20 \geq IP > 7$ ), que representa a suelos arcillosos, con respecto a la muestra patrón (0%).

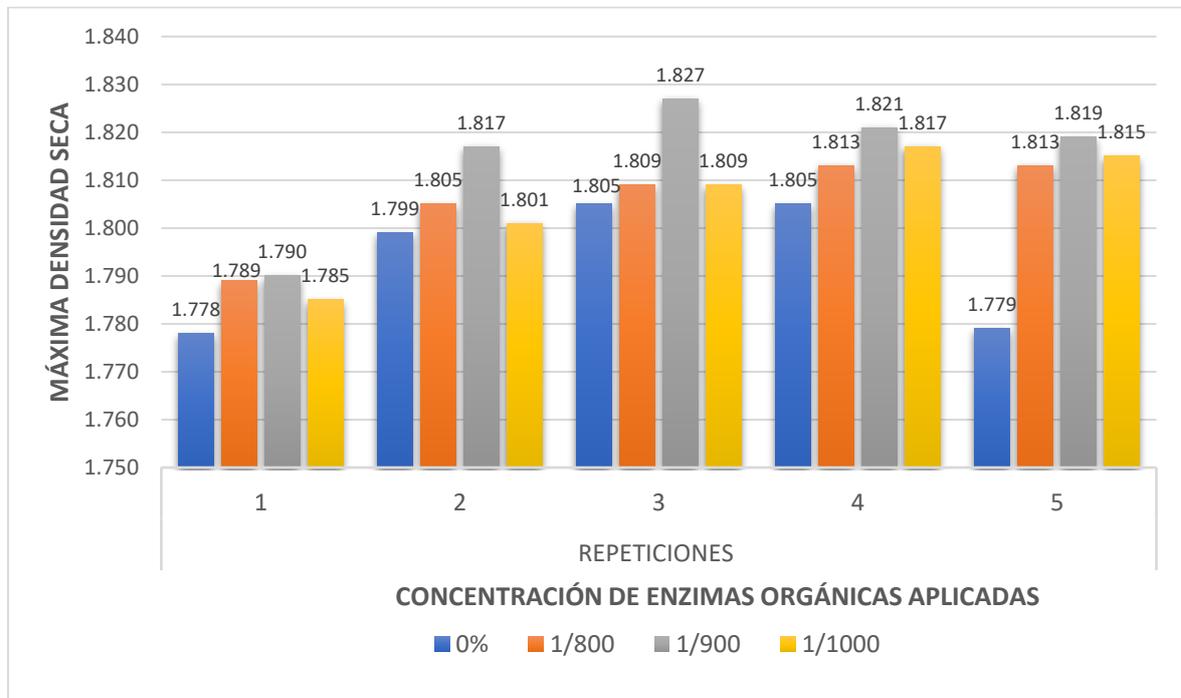
### 3.1.2. Proctor modificado

En la tabla 6 y tabla 7 se muestra los resultados de ensayo proctor modificado para un suelo limo arcilloso, obtenidos por cada concentración de enzimas orgánicas (0%, 1/800, 1/900, 1/1000), aplicadas para cada una de las cinco repeticiones realizadas en el laboratorio.

**Tabla 6.** Máxima densidad seca (MDS) por repetición

ENZIMAS ORGÁNICAS (%)	REPETICIONES				
	1	2	3	4	5
0%	1.778	1.799	1.805	1.805	1.779
1/800	1.789	1.805	1.809	1.813	1.813
1/900	1.790	1.817	1.827	1.821	1.819
1/1000	1.785	1.801	1.809	1.817	1.815

La tabla 6 muestra los resultados de máxima densidad seca (MDS), obtenidos por cada concentración de enzimas orgánicas aplicadas para cada una de las cinco repeticiones realizadas en el laboratorio.

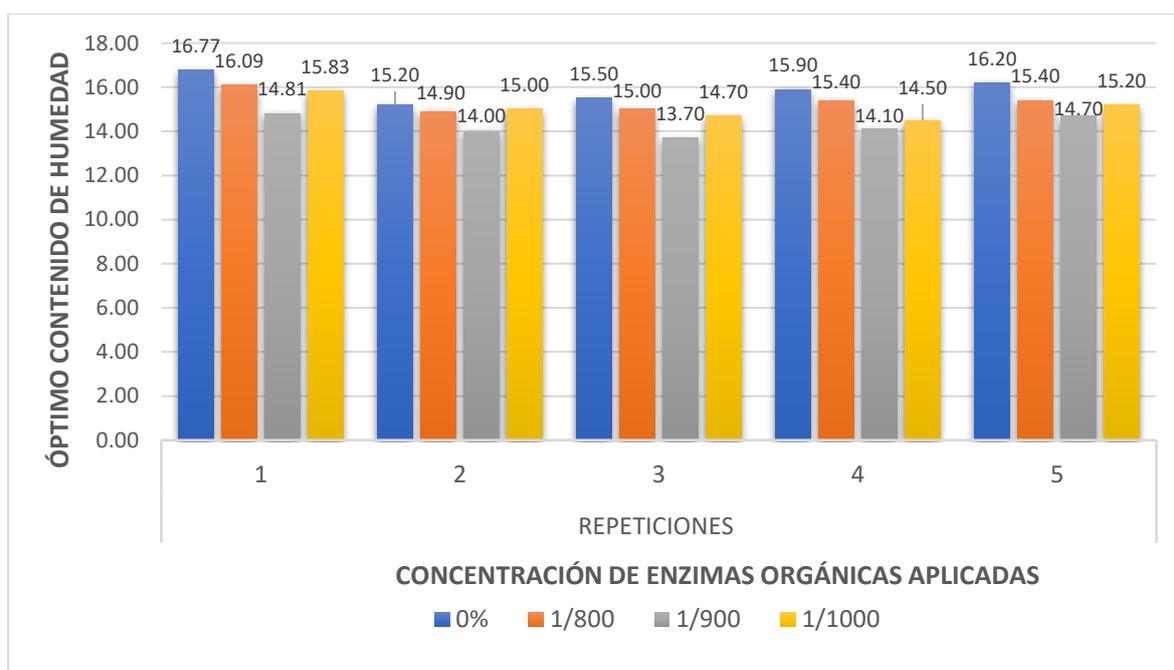


**Figura 5.** Máxima densidad seca (MDS) por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas.

**Tabla 7.** Óptimo contenido de humedad (OCH)

ENZIMAS ORGÁNICAS (%)	REPETICIONES				
	1	2	3	4	5
0%	16.77	15.20	15.50	15.90	16.20
1/800	16.09	14.90	15.00	15.40	15.40
1/900	14.81	14.00	13.70	14.10	14.70
1/1000	15.83	15.00	14.70	14.50	15.20

La tabla 7 muestra los resultados de óptimo contenido de humedad (OCH), obtenidos por cada concentración de enzimas orgánicas aplicadas para cada una de las cinco repeticiones realizadas en el laboratorio.



**Figura 6.** Óptimo contenido de humedad por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas

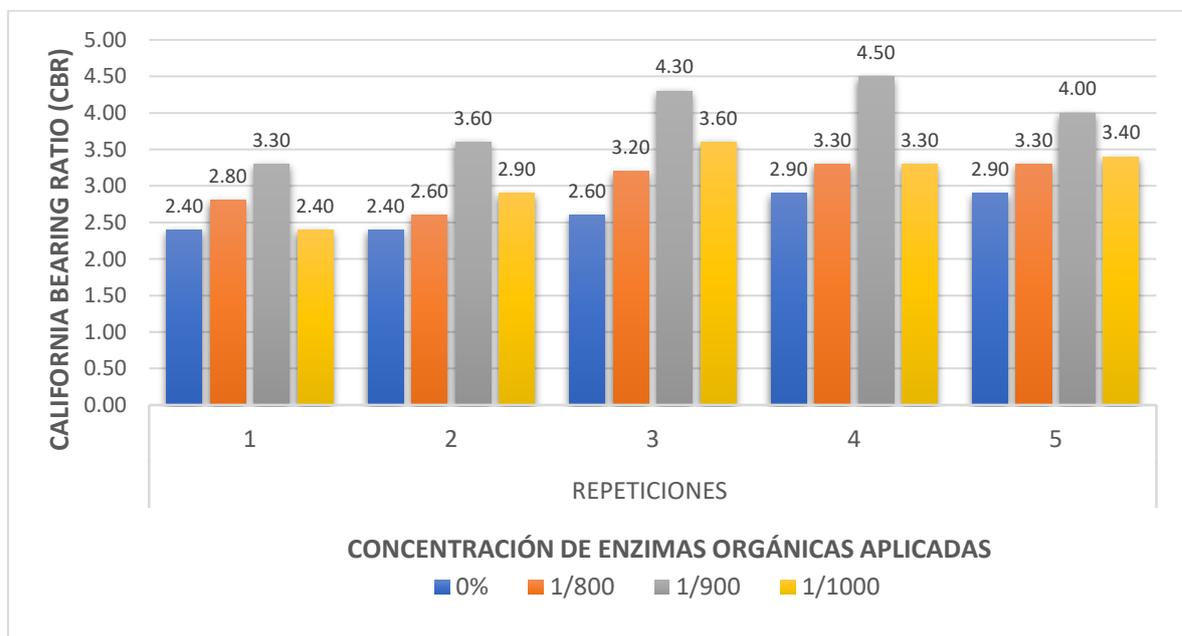
En la figura 5 y la figura 6 se puede evidenciar la humedad óptima de compactación, para las cinco repeticiones y por cada concentración de enzimas orgánicas, en la cual la densidad del suelo es máxima.

### 3.1.3. California Bearing Ratio (CBR)

**Tabla 8.** California Bearing Ratio (CBR)

ENZIMAS ORGÁNICAS (%)	REPETICIONES				
	1	2	3	4	5
0%	2.40	2.40	2.60	2.90	2.90
1/800	2.80	2.60	3.20	3.30	3.30
1/900	3.30	3.60	4.30	4.50	4.00
1/1000	2.40	2.90	3.60	3.30	3.40

En la tabla 8 se muestra los resultados de laboratorio de CBR, que está referido al 95 % de la máxima densidad seca y a una penetración de carga de 2.54 mm, obtenidos por cada concentración de enzimas orgánicas aplicadas para cada una de las cinco repeticiones realizadas en el laboratorio.



**Figura 7.** California Bearing Ratio (CBR) por repetición para cada concentración de enzimas orgánicas

En figura 7 se puede observar que las concentraciones de enzimas orgánicas aplicadas presentan cierta tendencia a mejorar el CBR del suelo en estudio, sin embargo, no deja de ser una subrasante inadecuada.

### 3.2. Análisis estadístico

Para la presente investigación se usó el modelo estadístico “Análisis de varianza” con un diseño completamente al azar. Utilizando la prueba “Diferencia mínima significativa de Fisher (DMS)” para determinar cuáles son los pares de medias que son diferentes.

#### 3.2.1. Análisis de varianza

“Es una metodología para analizar la variación entre muestras y la variación al interior de las mismas con varianzas, en lugar de rangos. Como tal, es un método estadístico útil para comparar dos o más medias poblacionales”. (Jiménez, 2012, pág. 52)

##### **Grados de libertad (GL)**

$$GL = N - 1$$

$$GL = 20 - 1 = 19$$

El grado de libertad debe ser mayor a 12, caso contrario no se puede hacer el análisis por falta de observaciones, por lo que tomando 5 repeticiones el  $GL = 19$ .

##### **Coefficiente de variación (CV)**

Es la confiabilidad de los datos que se obtuvieron en la investigación.

$$CV \leq 35 \text{ datos confiables}$$

$$CV > 35 \text{ datos no son confiables}$$

**Tabla 9.** Matriz base para el análisis de varianza

ENSAYO	CONCENTRACIONES APLICADAS	REPETICIONES					ΣCOMB.
		1	2	3	4	5	
<b>LÍMITE LÍQUIDO (LL)</b>	Sin adición	53.30	54.00	53.30	53.00	52.50	266.10
	1/800	51.70	52.20	52.70	52.10	51.50	260.20
	1/900	52.70	50.00	49.60	49.80	51.60	253.70
	1/1000	51.20	49.30	49.50	49.80	50.90	250.70
<b>LÍMITE PLÁSTICO (LP)</b>	Sin adición	30.86	30.40	31.80	30.60	30.60	154.26
	1/800	32.58	29.90	31.10	29.50	32.00	155.08
	1/900	30.97	29.60	30.20	30.40	30.90	152.07
	1/1000	30.98	30.20	30.00	29.60	31.00	151.78
<b>ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>	Sin adición	22.44	23.60	21.50	22.40	21.90	111.84
	1/800	19.12	22.30	21.60	22.60	19.50	105.12
	1/900	21.73	20.40	19.40	19.40	20.70	101.63
	1/1000	20.22	19.10	19.50	20.20	19.90	98.92
<b>MÁXIMA DENSIDAD SECA (MDS)</b>	Sin adición	1.778	1.799	1.805	1.805	1.779	8.966
	1/800	1.789	1.805	1.809	1.813	1.813	9.029
	1/900	1.790	1.817	1.827	1.821	1.819	9.074
	1/1000	1.785	1.801	1.809	1.817	1.815	9.027
<b>ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (OCH)</b>	Sin adición	16.77	15.20	15.50	15.90	16.20	79.6
	1/800	16.09	14.90	15.00	15.40	15.40	76.8
	1/900	14.81	14.00	13.70	14.10	14.70	71.3
	1/1000	15.83	15.00	14.70	14.50	15.20	75.2
<b>CBR</b>	Sin adición	2.4	2.4	2.6	2.9	2.9	13.2
	1/800	2.8	2.6	3.2	3.3	3.3	15.2
	1/900	3.3	3.6	4.3	4.5	4.0	19.7
	1/1000	2.4	2.9	3.6	3.3	3.4	15.6

N° COMBINACIONES 4  
 N° OBSERVACIONES 20

### 3.2.1.1. Límite líquido (LL)

**Tabla 10.** Análisis de varianza para límite líquido

				Fact. Corrección	53117.12	
FUENTE DE VARIACIÓN	GRADO DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	MEDIA CUADRÁTICA	FC	Ft 5%	Ft 1%
TRATAMIENTO	3	28.36	9.454			
ERROR EXPER.	16	12.30	0.769	12.29**	3.24	5.29
<b>TOTAL</b>	<b>19</b>	<b>40.67</b>				
					CV	1.70

Leyenda:

- ns : No significativo
- \* : Significativo
- \*\* : altamente significativo

Planteamiento de la hipótesis:

- H0 : M1=M2=M3=M4
- Ha : Al menos dos son diferentes

Ya que el  $FC > Ft 5\%$  y  $FC > Ft 1\%$  se rechaza la hipótesis H0, los límites líquidos tienen diferencia altamente significativa.

**Tabla 11.** Diferencia mínima significativa (DMS) para límite líquido

ENSAYO	REPETICIONES	TRATAMIENTOS (Proporciones aplicadas)			
		T0	T1	T2	T3
LÍMITE LÍQUIDO	1	53.30	51.70	52.70	51.20
	2	54.00	52.20	50.00	49.30
	3	53.30	52.70	49.60	49.50
	4	53.00	52.10	49.80	49.80
	5	52.50	51.50	51.60	50.90
		53.22	52.04	50.74	50.14

- Leyenda:
- T0 : Sin adición
  - T1 : 1/800
  - T2 : 1/900
  - T3 : 1/1000

1. REGLA DE DECISIÓN

En la tabla 10, como  $FC=12.29 > Ft_{5\%}=3.24$  se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ . Al rechazarse la hipótesis nula podemos proceder con la diferencia mínima significativa (DMS).

2. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

$H_0$  :  $U_i - U_j$  Nos establece la diferencia de las medias

$H_1$  :  $U_i \neq U_j$  Las medias son diferentes

3. CALCULO DE PARÁMETROS

$$DMS_{(\alpha)} = t(\alpha, GLEE) \sqrt{\frac{2MCEE}{n}}$$

$$DMS_{(0.05)} = t(0.05, 16) \sqrt{\frac{2(0.769)}{5}} = 0.97$$

4. CRITERIO DE RECHAZO

**Tabla 12.** Prueba de comparación de medias diferentes para límite líquido

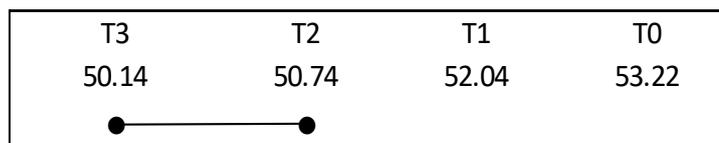
T0	53.22
T1	52.04
T2	50.74
T3	50.14

DIFERENCIA DE NIVELES	DIFERENCIA DE LAS MEDIAS	RESULTADOS	CONCLUSIÓN
T0 - T1	1.18	$1.18 > 0.97$	$T_0 \neq T_1$
T0 - T2	2.48	$2.48 > 0.97$	$T_0 \neq T_2$
T0 - T3	3.08	$3.08 > 0.97$	$T_0 \neq T_3$
T1 - T2	1.30	$1.30 > 0.97$	$T_1 \neq T_2$
T1 - T3	1.90	$1.90 > 0.97$	$T_1 \neq T_3$
T2 - T3	0.60	$0.60 < 0.97$	$T_2 = T_3$

5. INTERPRETACIÓN

**Figura 8.** Interpretación de DMS para LL



Los tratamientos 1/1000 (T3) y 1/900 (T2) tienen mayor incidencia en el límite líquido.

### 3.2.1.2. Límite plástico (LP)

**Tabla 13.** Análisis de varianza para límite plástico

				Fact. Corrección	18800.10	
FUENTE DE VARIACIÓN	GRADO DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	MEDIA CUADRÁTICA	FC	Ft 5%	Ft 1%
TRATAMIENTO	3	1.58	0.53			
ERROR EXPER.	16	10.98	0.69	0.769 ns	3.24	5.29
<b>TOTAL</b>	19	12.56				
					<b>CV</b>	<b>2.70</b>

Leyenda:

- ns** : No significativo
- \*** : Significativo
- \*\*** : altamente significativo

Planteamiento de la hipótesis:

- H0** :  $M_1=M_2=M_3=M_4$
- Ha** : Al menos dos son diferentes

Ya que el  $FC < Ft\ 5\%$  y  $FC < Ft\ 1\%$  se rechaza la hipótesis  $H_0$ , los límites plásticos tienen diferencia no significativa.

**Tabla 14.** Diferencia mínima significativa (DMS) para límite plástico

ENSAYO	REPETICIONES	TRATAMIENTOS (Proporciones aplicadas)			
		T0	T1	T2	T3
<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>	1	30.86	32.58	30.97	30.98
	2	30.40	29.90	29.60	30.20
	3	31.80	31.10	30.20	30.00
	4	30.70	29.50	30.40	29.60
	5	30.60	32.00	30.90	31.00
		30.87	31.02	30.41	30.36

- Leyenda:
- T0 : Sin adición
  - T1 : 1/800
  - T2 : 1/900
  - T3 : 1/1000

## 1. REGLA DE DECISIÓN

En la tabla 13, Como  $FC=0.769 < Ft_{5\%}=3.24$  se acepta la hipótesis nula  $H_0$ . Al aceptarse la hipótesis nula no podemos proceder con la diferencia mínima significativa (DMS).

Los tratamientos en el límite plástico se comportan de la misma manera.

### 3.2.1.3. Índice de plasticidad (IP)

**Tabla 15.** Análisis de varianza para índice de plasticidad

				Fact. Corrección		8715.73
FUENTE DE VARIACIÓN	GRADO DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	MEDIA CUADRÁTICA	FC	Ft 5%	Ft 1%
TRATAMIENTO	3	18.71	6.238			
ERROR EXPER.	16	17.64	1.103	5.66 **	3.24	5.29
TOTAL	19	36.36				
					CV	5.03

Leyenda:

- ns : No significativo
- \* : Significativo
- \*\* : altamente significativo

Planteamiento de la hipótesis:

$H_0$  :  $M_1=M_2=M_3=M_4$

$H_a$  : Al menos dos son diferentes

Ya que el  $FC > Ft_{5\%}$  y  $FC > Ft_{1\%}$  se rechaza la hipótesis  $H_0$ , los índices de plasticidad tienen diferencia altamente significativa.

**Tabla 16.** Diferencia mínima significativa (DMS) para índice de plasticidad

ENSAYO	REPETICIONES	TRATAMIENTOS (Proporciones aplicadas)			
		T0	T1	T2	T3
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	1	22.44	19.12	21.73	20.22
	2	23.60	22.30	20.40	19.10
	3	21.50	21.60	19.40	19.50
	4	22.40	22.60	19.40	20.20
	5	21.90	19.50	20.70	19.90
		22.37	21.02	20.33	19.78

Leyenda:                    T0            : Sin adición  
                                   T1            : 1/800  
                                   T2            : 1/900  
                                   T3            : 1/1000

1. REGLA DE DECISIÓN

En la tabla 15, Como  $FC=5.66 > Ft5\%=3.24$  se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ . Al rechazarse la hipótesis nula podemos proceder con la diferencia mínima significativa (DMS).

2. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

$H_0$  :  $U_i - U_j$         Nos establece la diferencia de las medias

$H_1$  :  $U_i \neq U_j$         Las medias son diferentes

3. CALCULO DE PARÁMETROS

$$DMS_{(\alpha)} = t(\alpha, GLEE) \sqrt{\frac{2MCEE}{n}}$$

$$DMS_{(0.05)} = t(0.05,16) \sqrt{\frac{2(1.103)}{5}} = 1.16$$

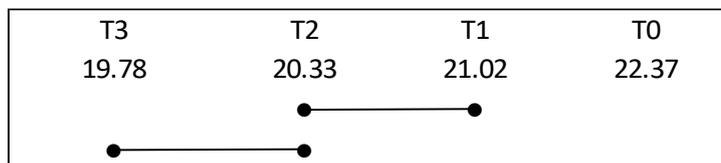
4. CRITERIO DE RECHAZO

**Tabla 17.** Prueba de comparación de medias diferentes para índice de plasticidad

T0	22.37		
T1	21.02		
T2	20.33		
T3	19.78		
DIFERENCIA DE NIVELES	DIFERENCIA DE LAS MEDIAS	RESULTADOS	CONCLUSIÓN
T0 - T1	1.34	$1.34 > 1.16$	$T_0 \neq T_1$
T0 - T2	2.04	$2.04 > 1.16$	$T_0 \neq T_2$
T0 - T3	2.58	$2.58 > 1.16$	$T_0 \neq T_3$
T1 - T2	0.70	$0.70 < 1.16$	$T_1 = T_2$
T1 - T3	1.24	$1.24 > 1.16$	$T_1 \neq T_3$
T2 - T3	0.54	$0.54 < 1.16$	$T_2 = T_3$

## 5. INTERPRETACIÓN

**Figura 9.** Interpretación de DMS para IP



El tratamiento 1/1000 (T3) tiene una mayor incidencia en el índice de plasticidad.

El tratamiento 1/900 (T2) no se considera de mayor incidencia ya que tiende a ser igual al mayor tratamiento (T1), así como también al menor tratamiento inmediato (T1).

### 3.2.1.4. Máxima densidad seca (MDS)

**Tabla 18.** Análisis de varianza para máxima densidad seca

				Fact. Corrección	65.15	
FUENTE DE VARIACIÓN	GRADO DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	MEDIA CUADRÁTICA	FC	Ft 5%	Ft 1%
TRATAMIENTO	3	0.0012	0.00039			
ERROR EXPER.	16	0.0026	0.00017	2.38 ns	3.24	5.29
<b>TOTAL</b>	<b>19</b>	<b>0.0038</b>				
					CV	0.71

Leyenda:

- ns** : No significativo
- \*** : Significativo
- \*\*** : altamente significativo

Planteamiento de la hipótesis:

- H0 : M1=M2=M3=M4
- Ha : Al menos dos son diferentes

Ya que el  $FC < Ft 5\%$  y  $FC < Ft 1\%$  se acepta la hipótesis H0, la máxima densidad seca tiene diferencia no significativa.

**Tabla 19.** Diferencia mínima significativa (DMS) para máxima densidad seca

ENSAYO	REPETICIONES	TRATAMIENTOS (Proporciones aplicadas)			
		T0	T1	T2	T3
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1	1.778	1.789	1.790	1.785
	2	1.799	1.805	1.817	1.801
	3	1.805	1.809	1.827	1.809
	4	1.805	1.813	1.821	1.817
	5	1.779	1.813	1.819	1.815
		1.793	1.806	1.815	1.805

Leyenda:

T0	: Sin adición
T1	: 1/800
T2	: 1/900
T3	: 1/1000

### 1. REGLA DE DECISIÓN

En la tabla 18, como  $FC=2.38 < Ft_{5\%}=3.24$  se acepta la hipótesis nula  $H_0$ . Al aceptarse la hipótesis nula no podemos proceder con la diferencia mínima significativa (DMS).

Los tratamientos en la máxima densidad seca se comportan de la misma manera.

### 3.2.1.5. Óptimo contenido de humedad (OCH)

**Tabla 20.** Análisis de varianza para óptimo contenido de humedad

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADO DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	MEDIA CUADRÁTICA	Fact. Corrección 4587.42		
				FC	Ft 5%	Ft 1%
TRATAMIENTO	3	7.131	2.377			
ERROR EXPER.	16	4.334	0.271	8.775 **	3.24	5.29
TOTAL	19	11.466				
					CV	3.44

Leyenda:

ns	: No significativo
*	: Significativo
**	: altamente significativo

Planteamiento de la hipótesis:

H0 : M1=M2=M3=M4  
 Ha : Al menos dos son diferentes

Ya que el  $FC > Ft 5\%$  y  $FC > Ft 1\%$  se rechaza la hipótesis H0, los óptimos contenidos de humedad tienen diferencia altamente significativa.

**Tabla 21.** Diferencia mínima significativa (DMS) para óptimo contenido de humedad

ENSAYO	REPETICIONES	TRATAMIENTOS (Proporciones aplicadas)			
		T0	T1	T2	T3
ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	1	16.77	16.09	14.81	15.83
	2	15.20	14.90	14.00	15.00
	3	15.50	15.00	13.70	14.70
	4	15.90	15.40	14.10	14.50
	5	16.20	15.40	14.70	15.20
		15.91	15.36	14.26	15.05

Legenda: T0 : Sin adición  
 T1 : 1/800  
 T2 : 1/900  
 T3 : 1/1000

### 1. REGLA DE DECISIÓN

En la tabla 20, como  $FC=8.775 > Ft5\%=3.24$  se rechaza la hipótesis nula H0. Al rechazarse la hipótesis nula podemos proceder con la diferencia mínima significativa (DMS).

### 2. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

H0 :  $U_i - U_j$  Nos establece la diferencia de las medias  
 H1 :  $U_i \neq U_j$  Las medias son diferentes

### 3. CALCULO DE PARÁMETROS

$$DMS_{(\alpha)} = t(\alpha, GLEE) \sqrt{\frac{2MCEE}{n}}$$

$$DMS_{(0.05)} = t(0.05, 16) \sqrt{\frac{2(0.271)}{5}} = 0.57$$

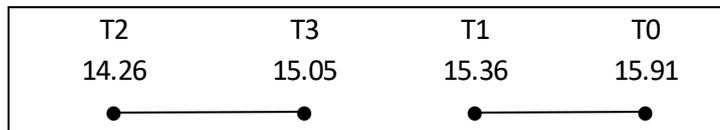
#### 4. CRITERIO DE RECHAZO

**Tabla 22.** Prueba de comparación de medias diferentes para OCH

T0	15.91		
T1	15.36		
T3	15.05		
T2	14.26		
DIFERENCIA DE NIVELES	DIFERENCIA DE LAS MEDIAS	RESULTADOS	CONCLUSIÓN
T0 - T1	0.55	$0.55 < 0.57$	T0 = T1
T0 - T3	0.86	$0.86 > 0.57$	T0 ≠ T3
T0 - T2	1.65	$1.65 > 0.57$	T0 ≠ T2
T1 - T3	0.31	$0.31 < 0.57$	T1 = T3
T1 - T2	1.10	$1.10 > 0.57$	T1 ≠ T2
T3 - T2	0.79	$0.79 > 0.57$	T3 ≠ T2

#### 5. INTERPRETACIÓN

**Figura 10.** Interpretación de DMS para OCH



Las proporciones 1/900 (T2) Y 1/1000 (T3) tienen una mayor incidencia en el óptimo contenido de humedad.

La proporción 1/800 (T1) no tiene mayor incidencia en el óptimo contenido de humedad por lo que mediante la prueba DMS se concluye que es igual a la muestra patrón (T0).

#### 3.2.1.6. California Bearing Ratio (CBR)

**Tabla 23.** Análisis de varianza para califonia Bearing Ratio

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADO DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	MEDIA CUADRÁTICA	FC	Ft 5%	Ft 1%
TRATAMIENTO	3	4.462	1.487			
ERROR EXPER.	16	2.544	0.159	9.353 **	3.24	5.29
TOTAL	19	7.006				
					CV	12.59

Fact. Corrección 202.88

Leyenda:

- ns : No significativo
- \* : Significativo
- \*\* : altamente significativo

Planteamiento de la hipótesis:

- H0 : M1=M2=M3=M4
- Ha : Al menos dos son diferentes

Ya que el  $FC > Ft\ 5\%$  y  $FC > Ft\ 1\%$  se rechaza la hipótesis H0, los CBR tienen diferencia altamente significativa.

**Tabla 24.** Diferencia mínima significativa (DMS) para califonia Bearing Ratio

ENSAYO	REPETICIONES	TRATAMIENTOS (Proporciones aplicadas)			
		T0	T1	T2	T3
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)	1	2.4	2.8	3.3	2.4
	2	2.4	2.6	3.6	2.9
	3	2.6	3.2	4.3	3.6
	4	2.9	3.3	4.5	3.3
	5	2.9	3.3	4.0	3.4
		2.64	3.04	3.94	3.12

- Leyenda:
- T0 : Sin adición
  - T1 : 1/800
  - T2 : 1/900
  - T3 : 1/1000

### 1. REGLA DE DECISIÓN

En la tabla 23, Como  $FC=9.353 > Ft5\%=3.24$  se rechaza la hipótesis nula H0. Al rechazarse la hipótesis nula podemos proceder con la diferencia mínima significativa (DMS).

### 2. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

- H0 :  $U_i - U_j$  Nos establece la diferencia de las medias
- H1 :  $U_i \neq U_j$  Las medias son diferentes

### 3. CALCULO DE PARÁMETROS

$$DMS_{(\alpha)} = t(\alpha, GLEE) \sqrt{\frac{2MCEE}{n}}$$

$$DMS_{(0.05)} = t(0.05, 16) \sqrt{\frac{2(0.159)}{5}} = 0.44$$

### 4. CRITERIO DE RECHAZO

**Tabla 25.** Prueba de comparación de medias diferentes para California Bearing Ratio

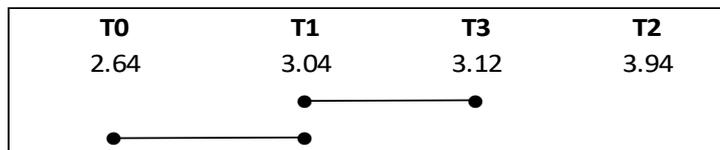
T2	3.94		
T3	3.12		
T1	3.04		
T0	2.64		

DIFERENCIA DE NIVELES	DIFERENCIA DE LAS MEDIAS	RESULTADOS	CONCLUSIÓN
T2 - T3	0.82	0.82 > 0.44	T2 ≠ T3
T2 - T1	0.90	0.90 > 0.44	T2 ≠ T1
T2 - T0	1.30	1.30 > 0.44	T2 ≠ T0
T3 - T1	0.08	0.08 < 0.44	T3 = T1
T3 - T0	0.48	0.48 > 0.44	T3 ≠ T0
T1 - T0	0.40	0.40 < 0.44	T1 = T0

### 5. INTERPRETACIÓN

**Figura 11.** Interpretación de DMS para CBR



La proporción 1/900 (T2) tiene una mayor incidencia en el CBR del suelo en estudio. Las proporciones 1/800 (T3) y 1/1000 (T1) no tienen mayor incidencia en el CBR por lo que el análisis DMS nos arroja como resultados iguales en comparación al suelo sin adición (T0).

#### IV. DISCUSIÓN

Según los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede sostener que las proporciones adicionadas a los suelos limo arcillosos de la subrasante (1/1000, 1/900 y 1/800) no cumplen con las normas estipuladas por el MTC en el manual de carreteras de bajo volumen de tránsito, sin embargo, presenta una mejora en sus características físicas y mecánicas considerando que el suelo en cuestión es sumamente malo (subrasante inadecuada), por lo que difiere con los resultados obtenidos por Quispe (2015), ya que estos estudian suelos granulares de cantera con características que cumplen con dichas normas.

Hidalgo (2016) en su investigación “Análisis comparativo de los procesos de estabilización de suelo con enzimas orgánicas y suelo-cemento, aplicado a suelos arcillosos de sub-rasante”, presenta una cierta mejora en los límites de Atterberg, sin embargo, solo realiza los ensayos de laboratorio con una sola proporción de enzimas orgánicas, por lo que en comparación con la presente investigación se evidencia que los límites de Atterberg tienden a aumentar con una mayor adición de enzimas orgánicas.

Los resultados obtenidos por Quispe (2015) en su investigación “Incidencia de la adición de aditivo Perma-Zyme 22x en suelos con alto contenido de finos para la construcción de carreteras de tipo afirmado”, los ensayos de proctor modificado, evidencia que, a mayor proporción de enzimas orgánica, presenta un mayor incremento de la máxima densidad seca del suelo, lo cual difiere con lo obtenido en la presente investigación, ya que, llega un punto en la adición de enzimas orgánicas, que presenta el mayor incremento de la máxima densidad seca, para luego disminuir con la mayor proporción adicionada. Esta diferencia se ve reflejada debido a que los suelos estudiados por ambos investigadores son distintos, Quispe (2015) estudia material granular de cantera, mientras que la presente investigación estudia suelos limo arcillosos de la subrasante.

Ravines (2010) en su investigación “Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador se suelos para carretas”, obtiene los mejores resultados combinando material de cantera (75%) y suelo arcilloso (25%), lo cual guarda relación con la presente investigación ya que el suelo que estudió tiene gran cantidad

de finos y a mediada que va adicionando mayor cantidad de enzimas orgánicas el CBR va incrementando hasta cierto punto, luego baja con la mayor proporción adicionada.

De acuerdo a los resultados de CBR obtenidos por Cedeño (2013) en “Investigación de la estabilización de suelos con enzima aplicado a la sub-rasante de la avenida Quitumbe – Ñan, cantón Quito”, el suelo natural sin ninguna modificación parte de una subrasante regular que se encuentra entre  $6\% \leq \text{CBR} < 10\%$ , a una subrasante buena, mejorada con enzimas orgánicas, que se encuentra entre  $10\% \leq \text{CBR} < 20\%$ , verificando el aumento en la capacidad de soporte del suelo en un 66% con respecto al valor inicial; mientras tanto en la presente investigación, mediante el análisis estadístico, se verificó un aumento del 49% en la capacidad de soporte del suelo para la proporción de enzimas orgánicas aplicadas que presenta mayor incremento (1/900), sin embargo, el suelo natural parte de una subrasante inadecuada ( $\text{CBR} < 3\%$ ) a una subrasante pobre ( $3\% \leq \text{CBR} < 6\%$ ), mejorada con la aplicación de enzimas orgánicas en una proporción de 1/900.

## V. CONCLUSIONES

La adición de enzimas orgánicas como agente estabilizante de suelos limo arcillosos a nivel de subrasante, en las proporciones aplicadas (0%, 1/800, 1/900 y 1/1000) mejoran mínimamente las propiedades físico-mecánicas de estos, sin embargo, no deja de ser una subrasante pobre o inadecuada que no cumple con las normas estipuladas por el MTC.

La carretera desvío Pucacruz presenta suelos limo arcillosos de alta plasticidad, los cuales evidencian suelos inadecuados para los pavimentos, es por esta razón que se delimita como área de estudio de la presente investigación, teniendo en cuenta que un suelo con esta característica puede ser un elemento riesgoso en la subrasante de una estructura de pavimento, debido a su gran sensibilidad al agua.

En las propiedades físicas del suelo, para los límites de Atterberg, las concentraciones de enzimas orgánicas aplicadas presentan una mejora en la plasticidad del suelo en estudio, que van de una plasticidad alta a una plasticidad media. La clasificación de suelos, mediante la clasificación AAHSTO, tienen un tipo de material que son suelos limo arcillosos; y de acuerdo a la clasificación según índice de grupo (IG) indica un suelo de subrasante inadecuado al ser  $IG > 9$ . En las propiedades mecánicas del suelo, de acuerdo a la prueba diferencia mínima significativa del análisis estadístico, las concentraciones de enzimas orgánicas aplicadas para la máxima densidad seca, se comportan de la misma manera, teniendo una diferencia no significativa; así mismos, mediante el análisis estadístico, se confirma una mejoría en el CBR hasta la concentración 1/900, para luego disminuir con la mayor concentración 1/800.

De acuerdo a la prueba diferencia mínima significativa del análisis estadístico, la concentración de enzimas orgánicas 1/900, presenta una mayor incidencia en la resistencia del suelo (CBR), sin embargo, no deja de ser una subrasante pobre o inadecuada; se muestra también, que la concentración 1/1000 y 1/800 no tienen mayor incidencia, por lo que, para el análisis de diferencia mínima significativa (DMS), tienen igual comportamiento que el suelo sin ninguna adición (suelo natural).

## **VI. RECOMENDACIONES**

- ❖ A futuros investigadores en relación al tema de investigación:
  - ✓ Para estabilizar suelos limo arcillosos a nivel de sub rasante con la adición de enzimas orgánicas se recomienda agregar material de préstamo granular con una concentración de enzimas orgánicas de 1/900, por darse mejores resultados en sus características físico-mecánicas.
  - ✓ Para la ejecución de los ensayos de laboratorio correspondiente, se recomienda que la muestra de suelo este completamente seco, para así no alterar los resultados de estos.
- ❖ A las autoridades de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas:
  - ✓ Implementar laboratorios especializados en suelos, para proveer y facilitar el desarrollo de futuras investigaciones, ya que, al no contar con estos, se dificulta el desarrollo de investigaciones enfocadas a mecánica de suelos.
- ❖ A las autoridades de la municipalidad provincial de Chachapoyas:
  - ✓ Promover investigaciones enfocadas a mecánica de suelos para mejorar la construcción, mantenimiento, reparación y rehabilitación de caminos en Chachapoyas, para que estos sean más duraderos y tengan un menor gasto económico.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cedeño, D. (2013). *Investigación de la estabilización de suelos con enzima aplicado a la sub-rasante de la avenida Quitumbe - Ñan, cantón Quito*. Previo a la obtención del título de ingeniero civil. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Díaz, J. (2014). *Mecánica de suelos: naturaleza y propiedades* (Primera ed.). México: Trillas.
- Hidalgo, D. (2016). Análisis comparativo de los procesos de estabilización de suelo con enzimas orgánicas y suelo-cemento, aplicado a suelos arcillosos de sub-rasante. *Trabajo experimental previo a la obtención del título de ingeniero civil*. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador .
- Jiménez, R. (2012). *Estadística Inferencial II*. Instituto Tecnológico de Ensenada, Baja California, Mexico.
- Juarez , E., & Rico, A. (2011). *Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos* (Quinta ed., Vol. 1). México: Limusa.
- Lázaro, E., & Bazán, H. (2013). *Manual de metodología de la investigación científica* (Cuarta ed.). Chachapoyas, Perú: Universitaria UNTRM-A.
- MTC. (2014). *Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección: suelos y pavimentos* (Primera ed.). Lima, Perú: Macro.
- MTC. (2016). *Manual de ensayo de materiales* (Mayo de 2016 ed.). Lima, Perú.
- Pérez, J., & Merino, M. (2012). *Definición de método inductivo*. Obtenido de Definicion.DE: <https://definicion.de/metodo-inductivo/>
- Quispe, A. (2015). Incidencia de la adición de aditivo Perma-Zyme 22x en suelos con alto contenido de finos para la construcción de carreteras de tipo afirmado. *Tesis para optar el grado académico de magíster en ingeniería civil*. Juliaca, Perú.
- Ravines, M. (2010). Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras. *Tesis para optar el título de ingeniero civil*. Universidad de Piura. Piura, Perú.

## ANEXOS

### ANEXO 1. Panel fotográfico



**Figura 12.** Obtención de la muestra de suelo arcillosos mediante una calicata



**Figura 13.** Secado y disgregado de la muestra



**Figura 14.** Adición de las enzimas orgánicas



**Figura 15.** Analisis granulometrico



**Figura 16.** Límites de consistencia

**ANEXO 2.** Tablas de interpretación de resultados de ensayos de laboratorio

**Tabla 26.** Numero de calicatas para exploración de suelos

Tipo de carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de calicatas	Observaciones
Autopistas: IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>• Calzadas 3 carriles por sentido 4 calicatas x km x sentido</li> <li>• Calzada 4 carriles por sentido 6 calicatas x km x sentido</li> </ul>	
Carreteras duales o multicarril: IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	1.50 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>• Calzada 3 carriles por sentido 4 calicatas x km x sentido</li> <li>• Calzada 4 carriles por sentido 6 calicatas x km x sentido</li> </ul>	Las calicatas se
Carreteras de primera clase: IMDA entre 4000 y 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	respecto al nivel de sub rasante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 calicatas x km</li> </ul>	ubicarán longitudinalment e y en forma alterna
Carreteras de segunda clase: IMDA entre 2000 y 401 veh/día, de una calzada de dos carriles.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 calicatas x km</li> </ul>	
Carretera de tercera clase: IMDA entre 400 y 201 veh/día, de una calzada de dos carriles.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 calicatas x km</li> </ul>	
Carretera de bajo volumen de transito: IMDA ≤ 200 veh/día, de una calzada.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 calicata x km</li> </ul>	

Fuente: (Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos. MTC, 2014)

**Tabla 27.** Clasificación de los suelos según índice de plasticidad

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

**Fuente:** (MTC, 2014)**Tabla 28.** Clasificación de los suelos según tamaño de partículas

Tipo de material	Tamaño de las partículas
Grava	75 mm – 4.75 mm
	Arena gruesa:
	4.75 mm – 2.00 mm
	Arena media:
	2.00 mm – 0.425 mm
	Arena fina:
	0.425 mm – 0.075 mm
Material fino	Limo
	Arcilla
	0.075 mm – 0.005 mm
	Menor a 0.005 mm

**Fuente:** (MTC, 2014)

**Tabla 29.** Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

Tipo de suelo	Clasificación	Clasificación					
		Grupo	Nombre				
SUELOS GRUESOS	Gravas	Gravas limpias	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada		
más del 50% es retenido en tamiz N° 200	Mas del 50% de la fracción gruesa es retenido en tamiz N°4	Menos de 5% de finos	$Cu < 4$ y/o $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada		
		Grava con finos	Finos clasificados como ML o MH	GM	Grava limosa		
		Mas de 12% de finos	Finos clasificados como CL o CH	GC	Grava arcillosa		
		Arenas	Arenas limpias	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada	
		50% o más de la fracción gruesa pasa el tamiz N°4	Menos de 5% de finos	$Cu < 6$ y/o $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada	
		Arenas con finos	Finos clasificados como ML o MH	SM	Arene limosa		
		Mas de 12% de finos	Finos clasificados como CL o CH	SC	Arena arcillosa		
		SUELOS FINOS	Limos y arcillas	Inorgánico	$IP > 7$ y cae sobre o arriba de la recta "A"	CL	Arena de baja plasticidad
		más del 50% es retenido en tamiz N° 200	LL < 50		$IP < 4$ y cae debajo de la recta "A"	ML	Limo de baja plasticidad
				Orgánica	LL < 0.75	OL	Arcilla orgánica
				OL	Limo orgánico		
		Limos y arcillas	Inorgánicas	IP cae sobre o arriba de la recta "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad	
		LL $\geq$ 50		IP cae debajo de la recta "A"	MH	Limo de alta plasticidad	
			Orgánico	LL < 0.75	OH	Arcilla orgánica	
					OH	Limo orgánico	
SUELOS MUY ORGÁNICOS	Prima la materia orgánica, color oscuro y hedor orgánico			PT	Turba		

Fuente: (Quispe, 2015)

**Tabla 30.** Sistema de clasificación AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares ( 35% o menos pasa el tamiz N° 200 )							Materiales limoarcillosos ( más de 35% pasa el tamiz N° 200 )			
	A - 1		A - 3 <sup>A</sup>	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
N° 10 ( 2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
N° 40 ( 425 μm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
N° 200 ( 75 μm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...		...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. <sup>B</sup>
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosos				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

<sup>A</sup> La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2

<sup>B</sup> El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30

Fuente: (Cedeño, 2013)

**Tabla 31.** Categorías de sub rasante CBR

Categoría de subrasante	CBR
S <sub>0</sub> : Subrasante inadecuada	CBR < 3%
S <sub>1</sub> : Subrasante pobre	De CBR ≥ 3% a CBR < 6%
S <sub>2</sub> : Subrasante regular	De CBR ≥ 6% a CBR < 10%
S <sub>3</sub> : Subrasante buena	De CBR ≥ 10% a CBR < 20%
S <sub>4</sub> : Subrasante muy buena	De CBR ≥ 20% a CBR < 30%
S <sub>5</sub> : Subrasante excelente	CBR ≥ 30%

Fuente: (MTC, 2014)

ANEXO 3. Tabla T-Student para el análisis DMS

Tabla t-Student



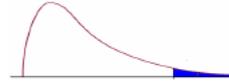
Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333
34	0.6818	1.3070	1.6909	2.0322	2.4411	2.7284
35	0.6816	1.3062	1.6896	2.0301	2.4377	2.7238
36	0.6814	1.3055	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195
37	0.6812	1.3049	1.6871	2.0262	2.4314	2.7154
38	0.6810	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116
39	0.6808	1.3036	1.6849	2.0227	2.4258	2.7079
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045
41	0.6805	1.3025	1.6829	2.0195	2.4208	2.7012
42	0.6804	1.3020	1.6820	2.0181	2.4185	2.6981
43	0.6802	1.3016	1.6811	2.0167	2.4163	2.6951
44	0.6801	1.3011	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923
45	0.6800	1.3007	1.6794	2.0141	2.4121	2.6896
46	0.6799	1.3002	1.6787	2.0129	2.4102	2.6870
47	0.6797	1.2998	1.6779	2.0117	2.4083	2.6846
48	0.6796	1.2994	1.6772	2.0106	2.4066	2.6822
49	0.6795	1.2991	1.6766	2.0096	2.4049	2.6800

50	0.6794	1.2987	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778
51	0.6793	1.2984	1.6753	2.0076	2.4017	2.6757
52	0.6792	1.2980	1.6747	2.0066	2.4002	2.6737
53	0.6791	1.2977	1.6741	2.0057	2.3988	2.6718
54	0.6791	1.2974	1.6736	2.0049	2.3974	2.6700
55	0.6790	1.2971	1.6730	2.0040	2.3961	2.6682
56	0.6789	1.2969	1.6725	2.0032	2.3948	2.6665
57	0.6788	1.2966	1.6720	2.0025	2.3936	2.6649
58	0.6787	1.2963	1.6716	2.0017	2.3924	2.6633
59	0.6787	1.2961	1.6711	2.0010	2.3912	2.6618
60	0.6786	1.2958	1.6706	2.0003	2.3901	2.6603
61	0.6785	1.2956	1.6702	1.9996	2.3890	2.6589
62	0.6785	1.2954	1.6698	1.9990	2.3880	2.6575
63	0.6784	1.2951	1.6694	1.9983	2.3870	2.6561
64	0.6783	1.2949	1.6690	1.9977	2.3860	2.6549
65	0.6783	1.2947	1.6686	1.9971	2.3851	2.6536
66	0.6782	1.2945	1.6683	1.9966	2.3842	2.6524
67	0.6782	1.2943	1.6679	1.9960	2.3833	2.6512
68	0.6781	1.2941	1.6676	1.9955	2.3824	2.6501
69	0.6781	1.2939	1.6672	1.9949	2.3816	2.6490
70	0.6780	1.2938	1.6669	1.9944	2.3808	2.6479
71	0.6780	1.2936	1.6666	1.9939	2.3800	2.6469
72	0.6779	1.2934	1.6663	1.9935	2.3793	2.6458
73	0.6779	1.2933	1.6660	1.9930	2.3785	2.6449
74	0.6778	1.2931	1.6657	1.9925	2.3778	2.6439
75	0.6778	1.2929	1.6654	1.9921	2.3771	2.6430
76	0.6777	1.2928	1.6652	1.9917	2.3764	2.6421
77	0.6777	1.2926	1.6649	1.9913	2.3758	2.6412
78	0.6776	1.2925	1.6646	1.9908	2.3751	2.6403
79	0.6776	1.2924	1.6644	1.9905	2.3745	2.6395
80	0.6776	1.2922	1.6641	1.9901	2.3739	2.6387
81	0.6775	1.2921	1.6639	1.9897	2.3733	2.6379
82	0.6775	1.2920	1.6636	1.9893	2.3727	2.6371
83	0.6775	1.2918	1.6634	1.9890	2.3721	2.6364
84	0.6774	1.2917	1.6632	1.9886	2.3716	2.6356
85	0.6774	1.2916	1.6630	1.9883	2.3710	2.6349
86	0.6774	1.2915	1.6628	1.9879	2.3705	2.6342
87	0.6773	1.2914	1.6626	1.9876	2.3700	2.6335
88	0.6773	1.2912	1.6624	1.9873	2.3695	2.6329
89	0.6773	1.2911	1.6622	1.9870	2.3690	2.6322
90	0.6772	1.2910	1.6620	1.9867	2.3685	2.6316
91	0.6772	1.2909	1.6618	1.9864	2.3680	2.6309
92	0.6772	1.2908	1.6616	1.9861	2.3676	2.6303
93	0.6771	1.2907	1.6614	1.9858	2.3671	2.6297
94	0.6771	1.2906	1.6612	1.9855	2.3667	2.6291
95	0.6771	1.2905	1.6611	1.9852	2.3662	2.6286
96	0.6771	1.2904	1.6609	1.9850	2.3658	2.6280
97	0.6770	1.2903	1.6607	1.9847	2.3654	2.6275
98	0.6770	1.2903	1.6606	1.9845	2.3650	2.6269
99	0.6770	1.2902	1.6604	1.9842	2.3646	2.6264
100	0.6770	1.2901	1.6602	1.9840	2.3642	2.6259
∞	0.6745	1.2816	1.6449	1.9600	2.3263	2.5758

## ANEXO 4. Tabla de cuantiles de la distribución F para el ANOVA

### Distribución F 0.05

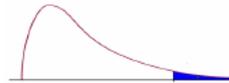
En las columnas se encuentran los valores F que corresponden al área 0.05 a la derecha  
 En las columnas se encuentran los grados de libertad del numerador  
 En los renglones se encuentran los grados de libertad del denominador.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	30	40	60	120
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.0	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.95	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.87	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35

### Distribución F 0.01

En las columnas se encuentran los valores F que corresponden al área 0.05 a la derecha  
 En las columnas se encuentran los grados de libertad del numerador  
 En los renglones se encuentran los grados de libertad del denominador.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	30	40	60	120
1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6083	6106	6157	6209	6235	6261	6287	6313	6339
2	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39	99.40	99.41	99.42	99.43	99.45	99.46	99.47	99.47	99.48	99.49
3	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35	27.23	27.13	27.05	26.87	26.69	26.60	26.50	26.41	26.32	26.22
4	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.55	14.45	14.37	14.20	14.02	13.93	13.84	13.75	13.65	13.56
5	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.05	9.96	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11
6	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.79	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.54	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.73	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.18	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40
10	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.77	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.46	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.22	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	4.02	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.86	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.73	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.62	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.52	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.43	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.36	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.29	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.24	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.18	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.14	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.09	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	3.06	2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	3.02	2.96	2.81	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.99	2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.96	2.90	2.75	2.60	2.52	2.44	2.35	2.26	2.17
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.93	2.87	2.73	2.57	2.49	2.41	2.33	2.23	2.14
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70														