

**CAPITULO I**  
**INTRODUCCION**

1.1.	Antecedentes .....	1
1.2.	Problema .....	2
1.3.	Justificacion .....	2
1.4.	Objetivos .....	3
1.4.1.	Objetivo general .....	3
1.4.2.	Objetivos especificos .....	3
1.5.	Hipotesis .....	4
1.6.	Variables .....	4
1.7.	Alcance .....	4

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

En Colombia, debido a las distintas condiciones no favorables para estabilizar subrasantes con los métodos convencionales, por sobre explotación ambiental de materiales de bancos de préstamo, el costo de transporte que requiere traer los materiales de lugares alejados, etc. Y debido además a la gran necesidad que tiene ese país contar con carreteras viales secundarias y terciarias, duraderas y estables.

La empresa colombiana de investigación CORASFALTOS, con la realización de este proyecto propuso una opción eficiente para la estabilización de suelos finos (limos y arcillas), porque los productos que actual se utilizan tienen el problema de formar estructuras rígidas susceptibles de romperse por el uso y con el tiempo.

Cuando esto ocurre, la ruptura es irreversible. De forma similar ocurre con los productos comerciales que reaccionan químicamente con el suelo. Es frecuente que en un tramo se encuentren varios tipos de suelos, ocasionando que los productos aplicados actúen en forma diferente en cada uno de los puntos de la vía. Por eso CORASFALTOS propuso la utilización de estabilizantes que puedan aplicarse sobre una gama de suelos desde los no plásticos hasta los altamente plásticos, ofreciendo la posibilidad de Re compactar el suelo en caso de su rompimiento.

En nuestro país Bolivia y específicamente en nuestro departamento Tarija la inestabilidad de los suelos es uno de los principales problemas también, que dificultan la construcción de vías terrestres, lo cual está estrechamente relacionado con el desarrollo económico de nuestra región ya que si no contamos con un buen camino, y dadas además las inclemencias climáticas producidas en este tiempo como lluvias excesivas y periodos extremadamente secos que provocan erosiones, existe la necesidad de contar con nuevos métodos de estabilización. De tal manera que en este contexto se estudiará las formas de mejorar las propiedades de las subrasantes mediante estabilizadores químicos éstos nos permitirán

controlar varios problemas en suelos finos como ser resistencia, favorecer a una fácil compactación y conservación, estabilidad volumétrica causada por la humedad.

## **1.2 PROBLEMA**

Actualmente el mantenimiento y construcción que reciben los caminos en Bolivia no es el más adecuado, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Es por esto que en este contexto nos centraremos en estudiar la utilización de estabilizantes químicos para mejorar las propiedades de los suelos finos, que suelen presentar muchos problemas como, bajos valores portantes, expansión y contracción de los suelos es decir una inestabilidad volumétrica, alta comprensibilidad, colapso del suelo, baja estabilidad en condiciones de saturación (durabilidad), vulnerabilidad a la erosión. Como podemos ver la gran parte de los problemas que presentan los suelos finos se debe a la presencia de humedad en dichos suelos, lo que se buscara de mejorar mediante el uso de estabilizantes químicos. Es por eso que el tema de los estabilizadores químicos aplicados a suelos finos ha tomado mucho interés en las investigaciones en los últimos tiempos ya que no existen normas en nuestro país sobre la utilización de este tipo de agente químico.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

En Bolivia la red vial está constituida mayormente por caminos de tierra, por lo que hay que brindar una mayor atención en desarrollar los caminos de tierra.

Si bien existen otros métodos de estabilización más económica a primera vista como la re compactación, combinación con otro suelo, aumento del espesor de la subrasante, elevar la rasante o simplemente cambiar el trazo vial. Muchas veces los factores para la elección del tipo de estabilización como requerimientos altos de resistencia, equipo adecuado, disponibilidad de suelos, aditivos, bancos de préstamos demasiado lejanos o por evitar sobre explotación de bancos de préstamos que dañen y desequilibren nuestro medio ambiente, al hacer nuestra comparación de costos podría ser más factible desde el punto de vista técnico como económico este tipo de estabilización química.

Con la realización de este trabajo se pretende contar con el respaldo técnico que avale las alternativas de mejorar los suelos químicamente con iones fosfato, calcio y sílice de manera que el aprovechamiento de los suelos en el lugar que se está realizando la construcción de nuestro pavimento sea el más óptimo.

Con esta investigación podremos establecer una solución de bajo costo, sin tener que contar equipo sofisticado para la realización de esta, pero con toda la calidad e importancia requerida que se le debe prestar a una buena subrasante, para que un cimiento de un pavimento ya sea flexible o rígido pueda darnos las condiciones aptas de resistencia y pueda tener larga vida sin tener que gastar mucho en mantenimientos continuos.

El presente sistema es muy factible para implementarlo en los caminos de tierra que pasen a ser pavimentados, cosa que también favorece a municipios que tienen bajo ingreso para poder tener acceso al desarrollo de los mismos a través de buenas vías de comunicación y preservando el medio ambiente con un proceso que en vez de dañar contribuya al ciclo hidrológico.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Analizar la utilización de estabilizantes químicos como el Ion Fosfato, Ion Calcio y el Ion Sílice a suelos finos (limos y arcillas) utilizados en subrasantes para que mediante la aplicación de estos se pueda cambiar y mejorar sus propiedades, de manera que mejoren sus condiciones como subrasantes en la construcción de pavimentos.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer los fundamentos teóricos necesarios para enfocar la investigación de estabilización de suelos finos (limos, arcillas) con ion fosfato, ion calcio e ion sílice.
- Realizar la toma de muestras y elaborar con estas los ensayos respectivos de laboratorio para determinar las propiedades físicas de dichos suelos finos.
- Establecer las características de los materiales que contienen ion fosfato, ion calcio e ion sílice y cuál es el proceso de su obtención.
- Plantear diferentes mezclas de prueba, y determinar la dosificación óptima con varios porcentajes de los iones fosfato, calcio y sílice con materiales finos (arcillas, limos) a través de ensayos de laboratorio.
- Evaluar los efectos de las propiedades del material estabilizado con iones fosfato, calcio y sílice en laboratorio (Proctor normal, CBR)

- Realizar un análisis de resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio hechas de las diferentes mezclas realizadas para diferentes suelos finos y estabilizantes químicos.
- Elaborar gráficos de incremento en porcentaje costo-resistencia para los distintos agentes químicos utilizados en la estabilización.

## **1.5 HIPÓTESIS**

La presente investigación considera las siguientes hipótesis:

- La adición de estabilizantes químicos a suelos finos, permitirá una mejora en sus propiedades mecánicas.
- Con la utilización de estabilizantes químicos y suelo fino se obtendrá subrasantes, aptos para uso en pavimentos.

## **1.6 VARIABLES**

La variable dependiente en nuestra investigación serán las propiedades de la subrasante que dependerá directamente de nuestra variable independiente que en este trabajo será los estabilizantes químicos como el Ion fosfato, Ion calcio y el Ion Sílice a utilizar que hará que las propiedades de la subrasante puedan aumentar en mayor o menor cantidad de acuerdo a la adición que se le dé al suelo fino (Arcilla, Limo, Limo arcilloso).

## **1.7 ALCANCE**

El trabajo estará encaminado al estudio del método de mejoramiento de las propiedades de subrasantes de suelos finos mediante agentes químicos ion fosfato, ion calcio y el ion sílice, aplicados a suelos finos que tengan las siguientes características.

Las arcillas que serán objeto de nuestra investigación deben tener las siguientes características:

- Índice de Plasticidad (Media)  $IP > 7$  a  $IP \leq 20$
- Índice de Grupo (Muy Pobre)  $IG > 9$
- Comprensibilidad (Baja)  $LL < 50\%$   $IP > 7\%$
- CBR (Pobre)  $CBR \geq 3$  a  $CBR < 6$

- Como no hay suelos en nuestro medio que contengan 100% de arcilla, se considerara en nuestro estudio como arcilla a suelos que contengan más del 51 % de arcilla en composición granulométrica.

Los Limos que serán objeto de nuestra investigación deben tener las siguientes características:

- Índice de Plasticidad (Media)  $IP < 7$
- Índice de Grupo (Muy Pobre)  $IG > 9$
- CBR (Pobre)  $CBR \geq 3$  a  $CBR < 6$
- Como no hay suelos en nuestro medio que contengan 100% de limo, se considerara en nuestro estudio como limo a suelos que contengan más del 51 % de limo en composición granulométrica.

Además esta investigación contemplará la elaboración de un documento que facilite a los estudiantes y profesionales interesados en el estudio del mejoramiento de las propiedades de las subrasantes de suelos finos información sobre estos tipos de agentes estabilizantes sus obtención, características, y su influencia en los suelos finos que son aplicados para la mejora de sus propiedades, proporcionando así una alternativa más para el tratamiento de caminos no pavimentados de tierra, que pueda ser apto desde el punto de vista estructural, económico y ecológico

Para dicho estudio será necesario lo siguiente:

- Ubicación de los sitios de obtención de las muestras:
- Extracción de muestras, para la caracterización de los materiales realizando siguientes pruebas:
  1. Análisis granulométrico
  2. Límites de Atterberg.
  3. Prueba de Proctor.
  4. Prueba de relación de soporte del suelo (CBR).
  5. Clasificación AASHTO de las Muestras.

- Se hará una investigación sobre la estabilización con ion fosfato - ion calcio- ion sílice para luego poder determinar las cantidades de combinación de % de estabilizante y suelo fino (arcilla, limo).
- Se procederá a diseñar y elaborar mezclas suelo fino y estabilizante químico ion fosfato, calcio y sílice para esto será necesario:
  1. Fabricación de probetas de suelo y el agente químico.
  2. Compactación de probetas de suelo y el agente químico.
  3. CBR
- Se analizarán los resultados obtenidos en las pruebas para poder proporcionar conclusiones y evaluaciones sobre la factibilidad técnica de la aplicación de este método a nuestro país y en especial a nuestra región.

## CAPITULO II

### SUBRASANTES

2.1.	Generalidades .....	7
2.2.	Condiciones para la formación de subrasantes.....	9
2.3.	Problemas en las subrasantes .....	10
2.4.	Caracterización de suelos finos de la subrasante.....	11
2.5.	Factores que influyen en el comportamiento de la subrasante. ....	13
2.5.1.	Tipo de suelo y sus propiedades.....	13
2.5.2.	Humedad y densidad .....	13
2.6.	Mejoramiento de subrasantes de suelos finos .....	13
2.6.1.	Descripción. ....	14
2.6.1.1	materiales.....	14
2.6.1.2	requerimientos de construcción.....	14
2.6.2.	Mejoramiento involucrando el suelo existente. ....	14
2.6.2.1.	Limitaciones en la ejecución.....	15
2.6.3.1	modo de ejecución de acuerdo a las condiciones de la subrasante. ..	15
2.6.3.2	aceptación de los trabajos.....	17
2.7.	Estabilización de los suelos finos.....	18
2.7.1.	Procesos de tratamiento de suelos finos.....	19
2.7.2.	Sustitución por otro suelo .....	20
2.7.3.	Mezcla con otros suelos .....	21
2.7.4.	Re compactación de los suelos.....	22
2.7.5.	Control de las condiciones de humedad.....	23
2.7.6.	Mezcla con conglomerantes.....	24
2.7.7.	Mezcla con otros productos estabilizadores.....	25
2.8.	Ensayos de resistencia y deformabilidad.....	25
2.8.1.	Ensayo de compactación considerando familias de curvas método de un punto (aashto t272) .....	26

2.8.2. Relaciones de peso unitario-humedad en suelos – método estándar (astm d698 aashto t99).....	27
2.8.3. Relaciones de peso unitario – humedad en los suelos – método modificado (astm d422 aashto t180).....	27
2.8.4. Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio (cbr de laboratorio) (astm d1883 aashto t193) .....	28
2.8.5. Determinación del valor de resistencia r y de la presión de expansión de	29
2.8.6. Mediciones de la presión de poros (aashto t252) consolidación unidimensional de los suelos (astm d2435 aashto t216).....	29
2.8.7. Consolidación unidimensional de los suelos (astm d2435 aashto t216)	29
2.8.8. Compresión inconfiada en muestras de suelos (atm d2126 aashto t208)	29
2.8.9. Parámetros de resistencia del suelo mediante compresión triaxial (astm d2850 aashto t234).....	30
2.8.10. Determinación de la resistencia al corte método de corte directo (cd) (consolidado drenado) (astm d3080 aashto t236).....	30
2.8.11. Resistencia no drenada en especímenes de rocas mediante compresión triaxial sin medir presiones de poros (astm 2664 aashto t226).....	31
2.8.12. Módulo resiliente de suelos de subrasante (aashto t274).....	31
2.8.13. Determinación de la succión de un suelo con el método del papel de filtro (aashto t273) .....	31

## INDICE DE ILUSTRACIONES

	<b>Pagina</b>
Ilustración 1. Subrasante en proceso de mejoramiento.....	7
Ilustración 2. Subrasante deteriorada por la humedad. ....	8
Ilustración 3. Subrasante agrietada .....	9
Ilustración 4. Influencia de las subrasante deteriorada en el transporte.....	11
Ilustración 5. Lugar de extracción de las muestras para nuestra investigación .....	12

## CAPÍTULO II

### SUBRASANTES

#### 2.1. GENERALIDADES

La subrasante es la superficie del terreno, sobre la cual se apoya la mejora a realizar. En las calles y caminos de bajo volumen de tránsito, está compuesta por el suelo de la traza. Excepción hecha de algunas mejoras altimétricas de terraplenamientos con suelos transportados de otros lugares, también se puede decir que la subrasante es la proyección sobre un plano vertical del desarrollo del eje de la sub corona. En la sección transversal es un punto cuya diferencia de elevación con la rasante, está determinada por el espesor del pavimento y cuyo desnivel con respecto al terreno natural sirve para determinar el espesor de corte o terraplén.



**Ilustración 1. Subrasante en proceso de mejoramiento**

Las características de estos suelos, entre algunos por mencionar la sensibilidad al agua, son algunos de los factores que determinan el alcance de las mejoras a realizar. Por ello que a fines del diseño estructural, resulta necesario conocerlos y evaluarlos.

De la calidad de ésta depende gran parte, del espesor que debe tener un pavimento sea flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo cargas del tránsito.

Como material de fundación, se debe establecer cuál es su resistencia mecánica y específicamente ante la presencia de cargas, se busca la relación entre la carga y la deformación unitaria sabiendo que la resistencia varía con las condiciones de humedad, compactación y confinamiento además que se debe controlar que se deban representarse en laboratorio las mismas condiciones del proyecto.

La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, la estabilización físico – química con aditivos como el cemento Portland, la cal, el asfalto, entre otras.

Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen. Los cambios de volumen en un suelo expansivo, pueden ocasionar graves daños a las estructuras que se apoyan sobre éste, por esta razón, al construir un pavimento hay que intentar al máximo controlar las variaciones volumétricas del mismo a causa de la humedad.



**Ilustración 2. Subrasante deteriorada por la humedad.**

La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, la estabilización físico – química con aditivos como el cemento Portland, la cal, el asfalto, entre otras.

Tiene una gran influencia en las operaciones de construcción del pavimento y en la eficiencia del mismo. Las subrasantes inestables presentan problemas relativos a la colocación y compactación de los materiales de base y/o sub base y no dan soporte adecuado para las subsiguientes operaciones de pavimentación.

Las respuestas estructurales de un pavimento (esfuerzos, desplazamientos y agrietamientos) son influidas significativamente por la subrasante. Un gran porcentaje de las deflexiones en la superficie de un pavimento se puede atribuir a la subrasante.



**Ilustración 3. Subrasante agrietada**

Por ser la deflexión de la superficie un criterio de diseño, es necesario asegurar que la caracterización de la subrasante sea la adecuada.

## **2.2. CONDICIONES PARA LA FORMACIÓN DE SUBRASANTES**

Las subrasantes deben cumplir las siguientes condiciones básicas:

- **EJECUTABILIDAD.-** Significa que sea posible su puesta en obra en debidas condiciones y de forma tecnológica.

- **ESTABILIDAD.-** Se refiere a la propia estructura de tierra sea estable al deslizamiento tanto desde el punto de vista interno como externo en el sentido de que exista suficiente estabilidad sobre el terreno en el que se asienta.
- **DEFORMABILIDAD.-** Hace referencia a las deformaciones que se produzcan, una vez que se construya el firme a soportar, debe ser admisible y compatible con la funcionabilidad y servicio del mismo, incluyendo la regulabilidad superficial de la capa de rodadura.
- **DURABILIDAD.-** Que hace referencia, por último, a que la obra ha de ser duradera y también garantizar la permanencia de las condiciones de servicio durante este periodo de diseño.

En este sentido, son básicos los procesos de alteración y sus factores más influyentes, como el agua, la temperatura y los agentes biológicos o químicos. Y por supuesto, el tipo de material utilizado en el propio relleno.

### **2.3. PROBLEMAS EN LAS SUBRASANTES**

- Compresibilidad (en general diferencial)
- Inestabilidad de terraplenes
- Deseccación (Asentamientos, agrietamientos)
- La vegetación acentúa las deformaciones
- Suelos Turbosos (Pt)
- Limos Orgánicos (Humedad Natural alta,  $LL > 50$ .  $IP < 0.73$  ( $LL - 20$ )).
- Limos inorgánicos con  $LL > 50$  y alta Humedad natural.
- Arcillas con alto Límite Líquido ( $LL > 50$ ) (CH) y Humedad natural cercana al Límite Líquido. Identificar mineralógicamente.

En la región, prevalecen los suelos arcillosos y arcillo limosos. Se caracterizan por la pérdida de capacidad portante cuando aumenta el contenido de humedad. En estado de saturación se produce la formación de barros con la consecuente inestabilidad para soportar las cargas del tránsito.



**Ilustración 4. Influencia de las subrasante deteriorada en el transporte.**

Los suelos son altamente variables y sus propiedades cambian a lo largo del proyecto, en medida de que existan cambios en la humedad, en la densidad o se establezcan influencias ambientales, es decir, que las propiedades de la subrasante cambian con el tiempo.

#### **2.4. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS FINOS DE LA SUBRASANTE**

La clasificación de los suelos se realiza en laboratorio, para lo cual se procede a la extracción de muestras. A tales efectos, se realiza una primera inspección visual para valorar la homogeneidad del tramo. Se determina la existencia de zonas heterogéneas o contaminadas con otros materiales. De resultar homogéneo el tramo, se extraerá como mínimo una muestra de cada doscientos a cuatrocientos metros. La cantidad de muestras a extraer, aumentará en tramos heterogéneos.

En nuestra investigación estudiaremos los suelos de subrasantes que se encuentran ubicados en el barrio Miraflores donde se está haciendo la apertura de caminos y donde se apreció bastante suelo arcilloso y limoso con las características que abarcan nuestro estudio.



Ilustración 5. Lugar de extracción de las muestras para nuestra investigación



Ilustración 6. Ubicación satelital del lugar de la extracción de las muestras

Para conocer las características de estos suelos y para saber si cumplían con las exigencias de suelos que estábamos necesitando para nuestro proyecto se los sometió a las siguientes pruebas de laboratorio:

- Análisis Granulométrico.
- Hidrómetro.
- Límites de Atterberg.
- Prueba del Proctor.
- Prueba de relación de soporte CBR.

La metodología utilizada para la realización de estos ensayos de laboratorio se las muestra en Anexos.

## **2.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LA SUBRASANTE.**

### **2.5.1. TIPO DE SUELO Y SUS PROPIEDADES.**

La mayoría de los tipos de suelos se analizan a partir de su clasificación en sistemas de uso general que se basan en la textura y la plasticidad, el tamaño y la distribución granulométrica de sus partículas, propiedades que tienen una influencia significativa en el comportamiento de los suelos bajo carga.

### **2.5.2. HUMEDAD Y DENSIDAD.**

Influyen en la resistencia y en el comportamiento bajo carga repetida de los suelos de la subrasante. Durante la construcción, los suelos de subrasante pueden ser compactados a una densidad y humedad específicas, que permiten establecer valores de resistencia para el diseño del pavimento. Sin embargo, tanto el contenido de humedad como la densidad pueden cambiar durante la construcción o después de ella.

## **2.6. MEJORAMIENTO DE SUBRASANTES DE SUELOS FINOS.**

### **2.6.1. DESCRIPCIÓN.**

Este trabajo consiste en la eventual disgregación de la subrasante existente, la mezcla, humedecimiento o aireación, compactación y perfilado final de acuerdo con la presente especificación, conforme con las dimensiones, alineamientos y pendientes señalados en los planos del proyecto y las instrucciones del Supervisor.

#### **2.6.1.1 MATERIALES.**

Los agentes químicos adicionados deberán presentar una calidad tal, que la subrasante mejorada cumpla los requisitos exigidos.

#### **2.6.1.2 REQUERIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN**

Los trabajos de mejoramiento deberán efectuarse según los procedimientos descritos en las especificaciones técnicas, puestos a consideración del Supervisor y aprobados por éste. Y su avance físico deberá ajustarse al programa de trabajo.

Si los trabajos de mejoramiento afectaran el tránsito de la vía o en sus intersecciones y cruces con otras vías, se considera la siguiente clasificación:

### **2.6.2. MEJORAMIENTO INVOLUCRANDO EL SUELO EXISTENTE.**

En el caso de que los documentos del proyecto prevean el mejoramiento involucrando los materiales del suelo existente, o el Supervisor lo considere conveniente, éstos se disgregarán en las zonas y con la profundidad establecida en los planos, empleando procedimientos aceptables por el Supervisor.

Los materiales que se empleasen para el mejoramiento de la subrasante y que deben de ser transportados hasta el lugar donde se realizan las obras deben de estar protegidos con una lona, humedecidos adecuadamente y contar con las condiciones de seguridad para que éstas no se caigan a lo largo de su recorrido e interrumpen el normal desenvolvimiento del tráfico.

El suelo de aporte para el mejoramiento se aplicará en los sitios indicados en los documentos del proyecto o definidos por el Supervisor, en cantidad tal, que se

garantice que la mezcla con el suelo existente cumpla las exigencias, en el espesor señalado en los planos o indicado por el Supervisor.

Los materiales disgregados y los de adición, se humedecerán o airearán hasta alcanzar la humedad apropiada de compactación y, previa la eliminación de partículas mayores de setenta y cinco milímetros (75 mm), si las hubiere, se compactarán hasta obtener los niveles de densidad establecidos.

Cuando se realizan los trabajos de compactación se debe verificar las condiciones de las viviendas, para que no sufran inconvenientes cuando se realiza esta labor.

### **2.6.3.1 LIMITACIONES EN LA EJECUCIÓN**

Los trabajos de mejoramiento de subrasantes sólo se efectuarán cuando no haya lluvia y la temperatura ambiente, a la sombra, sea cuando menos de dos grados Celsius (2°C) en ascenso y los suelos se encuentren a un contenido de humedad inferior a su límite líquido.

Deberá prohibirse la acción de todo tipo de tránsito sobre las capas en ejecución, hasta que se haya completado su compactación. Si ello no resulta posible, el tránsito que necesariamente deba pasar sobre ellas se distribuirá de manera que no se concentren huellas de rodaduras en la superficie.

### **2.6.3.2 MODO DE EJECUCIÓN DE ACUERDO A LAS CONDICIONES DE LA SUBRASANTE.**

#### **2.6.3.2.1 EJECUCIÓN DE MEJORAMIENTOS SUPERFICIALES.**

Estos tipos de mejoramientos presentan profundidades menores a 0.90m.

El procedimiento constructivo de los trabajos de mejoramiento será el siguiente.

- Realizar el corte en la plataforma.
- Habilitar ventanas de drenaje
- Eliminar el material de corte
- Perfilar y compactar el fondo del mejoramiento (suelo de fundación)

- Colocar material seleccionado con su humedad óptima
- Extender el material seleccionado sobre el terreno de fundación
- Compactar la capa de mejoramiento, empleando rodillos lisos.
- Ejecutar la corona del mejoramiento de los 0.30m superiores.

#### **2.6.3.2.2 EJECUCIÓN DE MEJORAMIENTO PROFUNDOS**

Estos tipos de mejoramientos presentan profundidades mayores o iguales a 0.90m, y se caracterizan por presentar suelos de fundación con altos contenidos de humedad mayores al límite líquido, que representan problemas de trabajabilidad para el perfilado y compactado del fondo del mejoramiento y consecuentemente para su estabilización.

El procedimiento constructivo de los trabajos de mejoramiento será el siguiente:

- Realizar el corte hasta 30cm antes de la profundidad autorizada.
- Evaluar el suelo encontrado, a fin que el Supervisor verifique la profundidad final de mejoramiento.
- De contar con aprobación continuar con los trabajos de corte hasta la profundidad autorizada.
- Habilitar ventanas de drenaje
- Eliminar el material de corte
- Colocar el material de base de mejoramiento o de ser el caso la arena recomendada, extendiéndola sobre el terreno de fundación, en una capa de 0.30m de altura promedio.
- Compactar la primera capa, usando un rodillo liso o en su defecto mediante cinco pasadas de tractor.
- Repetir la colocación de las demás capas de material seleccionado para base, en espesores de 30cm como máximo, seguidos de material seleccionado para cuerpo

en espesores de 25cm como máximo, hasta alcanzar un nivel 0.30m por debajo de la subrasante.

- Ejecutar la corona del mejoramiento de los 0.30m superiores.

#### **2.6.3.2.3 EXCAVACIÓN PARA MEJORAMIENTOS.**

Las excavaciones para mejoramientos se realizarán en los sectores autorizados por el Supervisor, la geometría de los mismos, incluida la profundidad será la indicada por el Supervisor.

El material de corte de los mejoramientos será eliminado.

El Contratista tiene la obligación de ejecutar los trabajos de drenaje necesarios para el control y eliminación de aguas durante y después de los trabajos de construcción del mejoramiento, a fin de evitar la saturación del suelo de fundación.

Las excavaciones para mejoramientos no deberán permanecer abiertas por más de 48 horas en condiciones normales y 24 horas en épocas de lluvia.

La ejecución de mejoramientos por debajo de la profundidad autorizada, para reemplazar suelos saturados por lluvia debido a la falta de un adecuado drenaje o por abandono de los trabajos, NO serán motivo de reconocimiento, al igual que los rellenos de las mismas,

Tampoco será motivo de reconocimiento los mayores volúmenes producto de incremento en las dimensiones autorizadas de los mejoramientos, que realice el contratista por error o conveniencia, ni la ejecución de rampas que habilite el mismo para la conformación de los mejoramientos ni el relleno de dichas rampas.

#### **2.6.3.3 ACEPTACIÓN DE LOS TRABAJOS.**

##### **2.6.3.3.1 CONTROLES.**

Durante la ejecución de los trabajos, el Supervisor efectuará los siguientes controles principales:

- Verificar el estado y funcionamiento de todo el equipo utilizado por el Contratista.
- Supervisar la correcta aplicación de los métodos de trabajo aceptados.
- Vigilar el cumplimiento de los programas de trabajo.
- Exigir el cumplimiento de las medidas de seguridad y mantenimiento del tránsito, según requerimientos de la Sección 103.
- Comprobar que los los materiales por emplear cumplan los requisitos de calidad exigidos.
- Verificar la compactación de todas las capas de suelo que forman parte de la actividad especificada.
- Realizar medidas para determinar espesores y levantar perfiles y comprobar la uniformidad de la superficie.

#### **2.6.3.3.2 CALIDAD DEL PRODUCTO TERMINADO**

El suelo mejorado deberá presentar una superficie uniforme y ajustarse al nivel de subrasante y pendientes establecidas. El supervisor deberá verificar, además que:

La distancia entre el eje del proyecto y el borde de la capa no sea inferior a la señalada en los planos o la definida por él.

La cota de cualquier punto, no varíe en más de diez milímetros (10 mm) de la cota proyectada.

#### **2.6.3.3.3 PROTECCIÓN DEL SUELO MEJORADO**

- El Contratista deberá responder por la conservación del suelo mejorado hasta que se coloque la capa superior y corregirá a su costo, cualquier daño que ocurra en ella después de terminada.
- El trabajo de "Mejoramiento de suelos de Subrasante" será aceptado cuando se ejecute de acuerdo con esta especificación, las indicaciones del Supervisor y se complete a satisfacción de éste.

### **2.7. ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS FINOS**

Como se ha visto, la presencia de suelos arcillosos, frecuentemente inevitable, suele ocasionar una serie de problemas y riesgos sobre las construcciones que el técnico proyectista o director de unas obras debe evitar o, al menos, atenuar.

Las formas de actuar ante la presencia de materiales problemáticos en el subsuelo suelen agruparse en tres grandes grupos de medidas, una vez que se ha comprobado la imposibilidad de cambiar el emplazamiento de la obra o que su coste es superior al daño o efecto a evitar. Éstas son las que siguen:

- a) La eliminación o sustitución de los materiales, ya en su totalidad ya parcialmente, por materiales aptos o menos sensibles;
- b) La modificación o tratamiento de los suelos mediante diversos mecanismos para hacerlos menos sensibles a los agentes que le hacen comportarse deficientemente
- c) La modificación de la tipología estructural para evitar que los efectos del comportamiento de dichos materiales afecten a la misma. Sin embargo estas soluciones, en la mayoría de las ocasiones, no consiguen eliminar el efecto nocivo en su totalidad. Bien, por ejemplo, porque no es posible sustituir todo el material, bien porque no es rentable o justificable la modificación del mismo o de la estructura hasta los extremos precisos, la realidad es que las soluciones citadas y que se describirán a continuación suelen constituir tan sólo paliativos parciales. Por ello es preciso pensar en estas medidas como actuaciones de tipo más preventivo que correctivo y que se aplican casi siempre.

### **2.7.1. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE SUELOS FINOS**

Los dos primeros grandes grupos de soluciones citados anteriormente incluyen todas las posibles actuaciones que conllevan la manipulación de los suelos para su adaptación a las necesidades constructivas. En estos grupos se centra el presente documento y por tanto, el contenido que se detalla a continuación.

Los principales mecanismos que se aplican para el tratamiento de los suelos arcillosos y la reducción de sus efectos perjudiciales sobre las construcciones se pueden agrupar en actuaciones mediante procesos físicos o procesos químicos.

Los más frecuentes son los siguientes:

**a) Procesos físicos:**

- \* Sustitución por materiales menos sensibles
- \* Mezcla con otros materiales
- \* Re compactación de los suelos
- \* Control de las condiciones de humedad

**b) Procesos químicos:**

- \* Mezcla con conglomerantes
- \* Mezcla con otros productos estabilizadores

Con la salvedad de la sustitución de suelos y el control del drenaje, el resto de las soluciones persiguen de una u otra manera modificar la masa del suelo arcilloso para convertirla en otra masa más rígida bien por la modificación de la disposición de las partículas bien por modificación de sus uniones.

Existen otros mecanismos como pueden ser las inyecciones volumétricas o el tratamiento eléctrico mediante ósmosis que por su limitada aplicación no son objeto de este apartado más allá de su simple mención.

A continuación se describen someramente los procesos mencionados como paso de entrada al tema que afecta en más profundidad este documento que es la estabilización de suelos mediante la mezcla con cal.

**2.7.2. SUSTITUCIÓN POR OTRO SUELO**

En ocasiones existe la posibilidad de la eliminación de los suelos arcillosos más allá del nivel que la explanación exige.

En estos casos la solución más intuitiva y fácil para evitar los problemas de los suelos arcillosos es la sobre excavación, remoción y sustitución de los mismos por materiales menos sensibles. Sin necesidad de recurrir a materiales selectos, esta

sustitución será efectiva en cuanto se eliminen no todos los efectos de los suelos arcillosos, sino los que afectan a la estructura a construir.

Pero esta posibilidad no siempre se plantea en las obras. Con frecuencia existen limitaciones económicas, medioambientales o incluso técnicas que limitan este recurso. Es el caso de obras pequeñas, de obras en zonas protegidas en las que es difícil encontrar un vertedero o un préstamo adecuado para la sustitución o, por ejemplo, de obras en las que los suelos arcillosos se encuentran bajo el nivel freático y esto complica su extracción.

### **2.7.3. MEZCLA CON OTROS SUELOS**

Una segunda solución frecuente para la problemática de los suelos arcillosos es su mezcla mecánica con otro tipo de suelos para modificar sus características.

Estas mezclas suelen realizarse con suelos arenosos o, en general, granulares ya que son los que en mejor medida pueden corregir los efectos de las arcillas. El proceso se basa fundamentalmente en la alteración granulométrica del suelo mediante la adición de partículas gruesas y la consiguiente dilución del efecto de las partículas finas características de las arcillas.

Con estas mezclas, convenientemente estudiadas y diseñadas, se eliminan fundamentalmente los efectos de plasticidad y de higroscopicidad que afectan al comportamiento mecánico de los suelos arcillosos y, en especial, a su dependencia del nivel de humedad. También se aumenta con este efecto la componente de fricción o rozamiento entre partículas que contribuye a la capacidad portante o resistente de los suelos. Esta componente es menos sensible a la presencia de agua que la cohesión entre partículas, por lo que otro de los efectos conseguidos es una mayor resistencia y más estabilidad de la misma.

Este mecanismo es bien conocido en el campo agrícola para la mejora de fincas y en la construcción de vías y pistas rurales en las que la única tecnología disponible es la maquinaria agrícola de gradeo y extensión de tierras y el único material asequible es el suelo, de mejor o peor calidad.

#### **2.7.4. RE COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS**

En ocasiones los efectos perjudiciales de los suelos arcillosos se deben a una estructura o disposición en cierto modo disgregada o poco densa que no permite su empleo o uso como asiento de construcciones. Esto puede deberse a la propia descompresión del terreno por la excavación, a su meteorización por la exposición ambiental o, sencillamente, a que las condiciones de pre consolidación en las que se encuentra el material no son adecuadas. En estos casos a veces basta como solución o actuación ante dicha disgregación la densificación mediante la re compactación del material para modificar su estructura y comportamiento. Esto hace que el material obtenido sea menos compresible, más resistente y por tanto menos deformable que el inicialmente presente.

Sin embargo, esta actuación es delicada porque los efectos que se pueden lograr pueden ser contrarios a los perseguidos si no se controla correctamente. Así, si un material arcilloso se compacta en exceso se puede llegar a obtener una reorientación de la estructura existente, dando lugar a otra laminar muy estratificada en caras paralelas a la de la compactación. Estas estructuras suelen ser mucho más sensibles a los efectos de atracción de agua y por tanto a los posibles hinchamientos y efectos perjudiciales posteriores.

Por ello, los niveles de re compactación de suelos arcillosos suelen requerir un estudio específico para determinar las condiciones de humedad y energía de compactación que minimizan su sensibilidad posterior.

Los métodos empleados para la re compactación de suelos arcillosos son a veces singulares dadas las características especiales de los mismos. Así, incluso la propia compactación mecánica suele realizarse empleando rodillos especiales del tipo conocido como “pata de cabra” dotados de protuberancias que facilitan la salida del agua y concentran las tensiones transmitidas. Otros métodos singulares son el empleo de impactos rápidos de alta energía, mediante golpeo con maza o explosivos, o incluso la compactación que podría llamarse natural o precarga a medio plazo

mediante la sobrecarga a niveles superiores a los estrictamente precisos para acelerar la consolidación.

### **2.7.5. CONTROL DE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD**

Una de las soluciones más frecuentes en la construcción para la limitación de los efectos nocivos de los suelos arcillosos consiste en actuar sobre el entorno para intentar controlar sus condiciones de humedad.

Esto se debe además a que como ya se ha citado casi nunca puede evitarse que queden materiales sin corregir y sobre ellos se adoptan estas medidas paliativas.

El principio de este mecanismo de actuación se basa en mantener constantes las características de las arcillas manteniendo fijo su nivel de saturación. En efecto, en ocasiones el problema no es la baja capacidad portante, las deformaciones excesivas o la inestabilidad por sí mismas, sino el riesgo de la variabilidad del comportamiento de las arcillas ante las modificaciones en su saturación.

Para ello lo que suele hacerse en las obras es controlar el flujo de agua desde el exterior de la misma hacia la parte que afecta a la construcción. Y este control se puede realizar, fundamentalmente, mediante captaciones o mediante barreras que impidan el acceso de los flujos.

Ejemplos de soluciones de este tipo son:

- \* Drenajes mediante zanjas perimetrales en construcciones junto a laderas o taludes;
- \* Drenajes transversales en terrenos sometidos al agua en su superficie (firmes);
- \* Impermeabilización de masas de suelo arcilloso mediante láminas y membranas;
- \* Impermeabilización mediante capas de materiales en su coronación;
- \* Impermeabilización de taludes;
- \* Impermeabilización de recintos en profundidad mediante pantallas de inyecciones.

Un caso especial de la corrección de las condiciones de humedad es el drenaje de las masas arcillosas para permitir la salida del agua intersticial que se ubica entre las

partículas ante eventuales incrementos de la presión. Esta solución, si bien se ejecuta mediante la modificación de las condiciones de drenaje, puede enmarcarse entre las que en el apartado anterior persiguen a re compactación o densificación de los suelos. Este mecanismo es el principio que gobierna los drenajes verticales mediante pilotes de grava o bandas drenantes empleados para el control de la consolidación en suelos arcillosos ante cargas verticales.

#### **2.7.6. MEZCLA CON CONGLOMERANTES**

El mecanismo del tratamiento de los suelos arcillosos mediante la adición de productos conglomerantes es quizás una de las soluciones tecnológicamente más avanzadas, pero también una de las más caras.

Quizás por ello su empleo se ha restringido hasta la fecha a grandes obras públicas o actuaciones singulares en las que el papel de los suelos tratados excedía de ser un simple sustrato de apoyo de construcciones y pasaba a adquirir responsabilidad estructural. Éste es el caso de las capas de firmes de suelos estabilizados. Las soluciones más frecuentes en este tipo de actuación son las que se conocen genéricamente como estabilizaciones, desarrolladas además con conglomerante hidráulicos:

Cal y cemento.

El principio de estos tratamientos se basa en la alteración del comportamiento de las arcillas mediante fenómenos de intercambio iónico y de modificación física de la estructura de sus partículas por las peculiaridades que tanto la cal como el cemento desarrollan en su contacto con las mismas y con el medio en que se mezcla, el agua. Se consigue así unificar en un sólo mecanismo gran parte de los efectos que se han estudiado en los anteriores, añadiendo los procesos químicos beneficiosos. En resumen se obtiene:

- \* Una floculación de partículas que da al suelo una estructura granular;
- \* Mayor fricción interna y por tanto, mayor resistencia directa;
- \* Menor susceptibilidad al nivel de saturación;

- \* Concentración de poros, lo que provoca una mejor evacuación del agua intersticial;
- \* Mejor aptitud para la compactación o densificación convencional;
- \* Modificación del nivel de acidez del agua que altera las fuerzas entre las partículas;
- \* Intercambios iónicos que estabilizan el riesgo de futuros cambios.

Se añade a estos mecanismos el efecto conglomerante a medio o largo plazo que tanto la cal como el cemento tienen y que aporta una rigidez a la mezcla muy superior a la del suelo primitivo.

Dado que la mezcla con cal es el objeto de este documento no se tratará en mayor extensión en este apartado esta solución.

#### **2.7.7. MEZCLA CON OTROS PRODUCTOS ESTABILIZADORES**

Finalmente hay que citar que existen ciertos tratamientos conocidos también como estabilizaciones mediante la adición de compuestos químicos que modifican fundamentalmente el comportamiento eléctrico de las arcillas y su susceptibilidad al intercambio iónico, reduciendo por tanto sus riesgos.

Un ejemplo es el uso de productos de floculantes que convierten al suelo en hidrófobos.

También se pueden incluir aquí los ligantes hidrocarbonados en forma de emulsiones. Su uso es muy limitado y, además, los efectos que se obtienen no parecen especialmente perdurables, por lo que su aplicación no se ha extendido con la rapidez que podría derivarse de unas ventajas inicialmente tan atractivas. Fundamentalmente se han usado para el sellado y tratamiento de superficies de caminos o pistas rurales construidas con materiales cohesivos o arcillosos.

#### **2.8. ENSAYOS DE RESISTENCIA Y DEFORMABILIDAD**

### **2.8.1. ENSAYE DE COMPACTACIÓN CONSIDERANDO FAMILIAS DE CURVAS MÉTODO DE UN PUNTO (AASHTO T272)**

Este método de ensayo se emplea para la determinación rápida del peso unitario máximo y de la humedad óptima de una muestra de suelo empleando una familia de curvas y un punto.

#### Método A

- Molde de diámetro 102 mm (4"), suelo que pasa tamiz de 4,75 mm (No. 4).

#### Método B

- Molde de diámetro 152 mm (6"), suelo que pasa tamiz de 4,75 mm (No.4).

#### Método C

-Molde de diámetro 102 mm (4"); suelo que pasa tamiz de 19,0 mm (3/4").

#### Método D

-Molde de diámetro 152 mm (6"); suelo que pasa tamiz de 19,0 mm (3/4").

Los métodos aquí descritos corresponden al Método S0402 y deberán seleccionarse en correspondencia con aquel, esto es, cuando se empleen las relaciones de humedad-peso unitaria, determinadas mediante el Método C de dicho método para formar la familia de curvas, entonces el Método C descrito en ésta deberá emplearse para la determinación del punto sencillo.

A través de estos métodos de ensayo se hace referencia directa al Método S0402 y la mayor parte de la terminología, aparatos y procedimientos son los mismos.

Adicionalmente, los conceptos descritos aquí, son aplicables a las determinaciones de un solo punto y a las relaciones de humedad-peso unitaria especificadas en el Método S0403, cuando se emplean los aparatos y métodos apropiados.

### **2.8.2. RELACIONES DE PESO UNITARIO-HUMEDAD EN SUELOS – MÉTODO ESTÁNDAR (ASTM D698 AASHTO T99)**

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 2,5 Kg. En caída libre desde una altura de 305 mm, con una energía específica de compactación de 0,59 J/cm<sup>3</sup> (□ 6 kg cm/cm<sup>3</sup>). En los suelos que no permiten obtener una curva definida de relación humedad/densidad y que contengan menos de un 12 % de partículas menores que 0,075mm (No 200), se debe determinar la densidad de acuerdo con el Método para Determinar la Densidad Relativa en Suelos No Cohesivos que explicara más adelante.

Se describen cuatro procedimientos alternativos:

- a) Método A - molde de 100 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 4,75mm (No 4).
- b) Método B - molde de 150 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 4,75mm (No 4).
- c) Método C - molde de 100 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 19mm (3/4’’).
- d) Método D - molde de 150 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 19mm (3/4’’).

El método por emplear debe indicarse en las especificaciones, según el material por ensayar. Si no se especifica, debe regirse por las indicaciones del método A.

### **2.8.3. RELACIONES DE PESO UNITARIO – HUMEDAD EN LOS SUELOS – MÉTODO MODIFICADO (ASTM D422 AASHTO T180)**

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 4,5 Kg. En caída libre, desde una altura de 460 mm, con una energía específica de compactación de 2,67 J/cm<sup>3</sup> (□ 27,2 kg cm/cm<sup>3</sup>). En suelos que no permiten obtener

una curva definida de relación humedad/densidad y que contengan menos de un 12% de partículas menores que 0,08 mm ( $\square$  ASTM N° 200), se debe determinar la densidad de acuerdo con el Método para Determinar la Densidad Relativa en Suelos No Cohesivos.

Se describen cuatro procedimientos alternativos:

- a) Método A - molde de 100mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 4,75mm (No 4).
- b) Método B - molde de 150mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 4,75mm (No 4).
- c) Método C - molde de 100mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 19mm (3/4").
- d) Método D – molde de 150mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 19mm (3/4").

El método por emplear debe indicarse en las especificaciones para el material que debe ensayarse. Si no se especifica debe regirse por las indicaciones del método D.

#### **2.8.4. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO (CBR DE LABORATORIO) (ASTM D1883 AASHTO T193)**

a) Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como Razón de Soporte de California (CBR). El ensaye se realiza normalmente a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables.

Nota 1: La denominación CBR se deriva de "California Bering Ratio".

b) Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, sobases, bases y capas de rodadura granulares.

c) No obstante que originalmente el método fue diseñado para evaluar el soporte de suelos de tamaño máximo 3/4" (19 mm), el ensaye es aplicable a todos aquellos suelos que contengan una cantidad limitada de material que pasa por el tamiz de 50 mm (2") y es retenido en el tamiz de 19 mm (3/4").

#### **2.8.5. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE RESISTENCIA R Y DE LA PRESIÓN DE EXPANSIÓN DE**

##### **Suelos compactados (ASTM D2844 AASHTO T190)**

Este método se refiere al procedimiento para ensayar suelos y áridos compactados tratados y no tratados, con los aparatos del estabilómetro y con los dispositivos de presión de expansión, para obtener resultados que indiquen su comportamiento cuando están colocados como subrasante, sub base, o base de una carretera, sometida a la acción del tránsito.

#### **2.8.6. MEDICIONES DE LA PRESIÓN DE POROS (AASHTO T252) CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS (ASTM D2435 AASHTO T216)**

Este método se refiere al procedimiento para medir las presiones de poros de suelos naturales en el campo.

#### **2.8.7. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS (ASTM D2435 AASHTO T216)**

Este método se refiere al procedimiento para determinar la tasa y la magnitud de la consolidación de muestras de suelos cuando se confinan lateralmente y se cargan y drenan axialmente.

#### **2.8.8. COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS (ATM D2126 AASTHO T208)**

1. El objeto de este método es indicar la forma de realizar el ensayo para determinar la resistencia a la compresión encofinada de suelos cohesivos bajo condiciones

inalteradas o remodeladas, aplicando carga axial, usando cualquiera de los métodos de resistencia controlada o deformación controlada.

Este ensayo se emplea únicamente para suelos cohesivos, ya que en un suelo carente de cohesión no puede formarse una probeta sin confinamiento lateral.

2. Resistencia a la compresión inconfiada, es la carga por unidad de área a la cual una probeta de suelo, cilíndrica o prismática, falla en el ensayo de compresión simple.

### **2.8.9. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO MEDIANTE COMPRESIÓN TRIAXIAL (ASTM D2850 AASHTO T234)**

Estos métodos se refieren a la determinación de los parámetros de resistencia de los suelos mediante el ensayo de compresión triaxial. Los métodos descritos son: el ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado (CU) con o sin medición de la presión de poros; el ensayo drenado (D), y el ensayo no consolidado no drenado (UU) con o sin medición de las presiones de poros. Los parámetros obtenidos son el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la cohesión (C), y cuando se midan las presiones en los poros, podrán calcularse los valores efectivos de la fricción interna y la cohesión, ( $\phi'$  y  $C'$ ). Los valores así obtenidos pueden emplearse en diferentes análisis de estabilidad como por ejemplo en fundaciones de estructuras; en cortes y taludes o en estructuras de retención, problemas en los cuales la resistencia del suelo a corto y largo plazo, tiene importancia significativa.

Cada uno de estos métodos requerirá el ensayo de un mínimo de tres probetas.

### **2.8.10. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE MÉTODO DE CORTE DIRECTO (CD) (CONSOLIDADO DRENADO) (ASTM D3080 AASHTO T236)**

Este método tiene por objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo.

Este ensayo puede realizarse sobre todos los tipos de suelos, con muestras inalteradas y re moldeadas.

### **2.8.11. RESISTENCIA NO DRENADA EN ESPECÍMENES DE ROCAS MEDIANTE COMPRESIÓN TRIAXIAL SIN MEDIR PRESIONES DE POROS (ASTM 2664 AASHTO T226)**

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia de una probeta de roca, en estado no drenado, sin medir presiones de poros, empleando compresión triaxial.

El método proporciona los datos para la determinación de la resistencia total y de las propiedades elásticas de las rocas (resistencia al esfuerzo cortante, variación lateral de la presión, ángulo de fricción interna, valor de la cohesión y módulo de Young).

La determinación de la resistencia de la roca, es función de la presión de confinamiento; este método es comúnmente usado en la simulación de las condiciones de resistencia prevalecientes en una masa de roca en estado natural.

### **2.8.12. MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS DE SUBRASANTE (AASHTO T274)**

1. Este método cubre los procedimientos normalizados para la determinación del módulo elástico dinámico (de resiliencia) de los suelos. Incluye la preparación y ensayo de suelos no tratados, bajo condiciones que representan una simulación razonable de las características físicas y de los estados de esfuerzos de los materiales de la subrasante, bajo pavimentos flexibles sometidos a las cargas debidas al tránsito.
2. Los métodos descritos, son aplicables a muestras inalteradas de materiales naturales, a muestras compactadas de sub-rasante y a muestras transportadas, preparadas para ser ensayadas, por compactación en el laboratorio.

### **2.8.13. DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN DE UN SUELO CON EL MÉTODO DEL PAPEL DE FILTRO (AASHTO T273)**

Este método establece el procedimiento para determinar la succión matricial de muestras inalteradas de suelo, por medio del método del papel de filtro.

## CAPITULO III

### AGENTES QUIMICOS EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS FINOS

3.1.	Introducción.....	32
3.2.	Agentes quimicos con ion fosfato. ....	32
3.2.1.	Fosfato diamonico.....	32
3.2.1.1.	Obtencion del agente. ....	32
3.2.1.2.	Caracteristicas y compocion quimica del agente. ....	33
3.3.	Agentes quimicos con ion fosfato. ....	34
3.3.1.	Triple 16.....	34
3.3.1.1.	Obtencion del agente. ....	34
3.3.1.2.	Caracteristicas y compocion química del agente. ....	35
3.4.	Agentes quimicos con ion calcio e ion silice. ....	36
3.4.1.	Polvo de silo.....	36
3.4.1.1.	Obtencion del agente. ....	36
3.4.1.2.	Caracteristicas y compocion del agente.....	36
3.5.	Mecanismos de interaccion entre el suelo y los agentes. ....	37
3.5.1.	Mecanismos de interacion limo-agente quimico.....	37
3.5.2.	Mecanismos de interacion arcilla-agente quimico.....	38
3.6.	Ensayos y mezclas a realizar entre el suelo fino y el agente quimico.....	39
3.7.	Análisis científico.....	40
3.7.1.	Media aritmética.....	40
3.7.2.	Mediana.....	41
3.7.3.	Moda. ....	41
3.7.4.	Desviación media.....	41
3.7.5.	Varianza. ....	42
3.7.6.	Máximos.....	42
3.7.7.	Mínimos.....	42

## INDICE DE ILUSTRACIONES

	<b>Pagina</b>
Ilustración 7 Forma comercial del agente químico F.Di amónico .....	32
Ilustración 8 Ciclo del fosforo .....	33
Ilustración 9 Forma comercial del agente químico Triple 16 .....	34
Ilustración 10 Proceso por el cual se obtiene el Polvo de silo. ....	36
Ilustración 11 Proceso de interferencia iónica producida entre el agente químico-arcilla.....	38
Ilustración 12 Ensayos a realizar Suelo – Agente químico.....	40

## INDICE DE CUADROS

Cuadro N° 12 Distribución granulométrica del agente Triple 16 .....	35
Cuadro N° 13 Composición química del Polvo de silo. ....	36

## INDICE DE FORMULAS

Ecuación 5 Formula para el cálculo del coeficiente a de actividad .....	38
Ecuación 6 Formula para el cálculo de la media aritmética.....	40
Ecuación 7 Formula para el cálculo de la mediana para número de datos impares....	41
Ecuación 8 Formula para el cálculo de la mediana para número de datos impares....	41
Ecuación 9 Formula para el cálculo de la desviación media. ....	41
Ecuación 10 Formula para el cálculo de la varianza.....	42

## CAPÍTULO III

### AGENTES QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS

#### 3.1. INTRODUCCIÓN.

Este capítulo, se enmarca en una jornada sobre tratamiento de suelos con agentes químicos, está enfocada a la aplicación de los químicos para la mejora de suelos arcillosos y limosos, sin entrar a considerar otros usos y posibilidades de dicho tratamiento que deben ser objeto de estudios particulares. En ella se repasan someramente los principios que gobiernan el proceso y se analizará tanto la situación normativa de los tratamientos de suelo con agentes químicos como la técnica de su diseño.

#### 3.2. AGENTES QUÍMICOS CON ION FOSFATO.

##### 3.2.1. FOSFATO DIAMÓNICO



Ilustración 1 Forma comercial del agente químico F.Di amónico

##### 3.2.1.1. OBTENCIÓN DEL AGENTE.

Los fertilizantes de fosfato de amonio estuvieron disponibles por primera vez en la década de 1960 y el DAP se convirtió rápidamente en el más popular dentro de esta clase de productos. Está formulado a base de una reacción controlada de ácido fosfórico con amoníaco, donde la mezcla caliente se enfría, se granula, y luego se tamiza. El DAP tiene excelentes propiedades de manejo y almacenamiento.

La cantidad de insumos necesarios para producir una tonelada de fertilizante DAP es de aproximadamente 1.5 a 2 toneladas de roca fosfórica, 0.4 toneladas de azufre (S)

para disolver la roca, y 0.2 toneladas de amoníaco. Cambios en la oferta o el precio de cualquiera de estos insumos tendrán un impacto en los precios y disponibilidad del DAP. El alto contenido de nutrientes del DAP es de gran ayuda en la reducción de los costos de manipuleo, transporte y aplicación. El DAP se produce en muchos lugares del mundo y es un producto ampliamente comercializado.

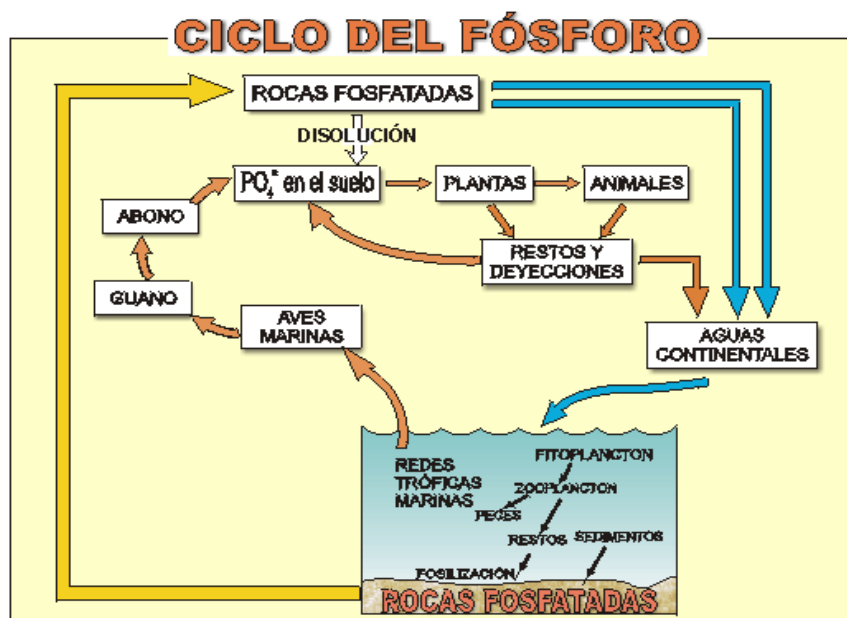


Ilustración 2 Ciclo del fosforo

### 3.2.1.2. CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICION QUÍMICA DEL AGENTE.

Nombre Químico: Fosfato ácido de amonio.

Otros Nombres: Fosfato Di amónico, Fosfato de Amonio Secundario, Fosfato ácido de di amonio.

Fórmula Química:  $(NH_4)_2HPO_4$     Peso Molecular (g/mol): 132.055

Contenido de Nitrógeno Total (N): 18% de Nitrógeno Amoniaco

Contenido de Fósforo ( $P_2O_5$ ):

- Fósforo Total 46%

- Fósforo Disponible 46%

- Fósforo Soluble en Agua 42%

Presentación Física:

Gránulos esféricos de color café oscuro, grisáceo o negro

Tamaño de partícula: 1.18 a 4.00 mm

Solubilidad en agua, a 20° C (100 g/100 ml): 58.0 g/100 ml. de agua

PH en solución al 10%: 7.4 – 8.0 Unidades

Densidad Aparente (Kg/m<sup>3</sup>): 955 – 1,040

Índice de Salinidad: 29.2

Humedad Relativa Crítica (a 30° C): 83 %

Acidez equivalente a Carbonato de Calcio: 69 partes de Carbonato de Calcio por 100 partes de DAP

### 3.3. AGENTES QUÍMICOS CON ION FOSFATO.

#### 3.3.1. TRIPLE 16



Ilustración 3 Forma comercial del agente químico Triple 16

##### 3.3.1.1. OBTENCIÓN DEL AGENTE.

Similarmente al anterior fertilizante este agente químico de fosfato está formulado a base de una reacción controlada de ácido fosfórico, pero además con nitrógeno y potasio en proporciones iguales de ahí su nombre triple 16 porque contiene 16 unidades de fósforo de igual forma 16 unidades de potasio y nitrógeno por cada 100

kg de fertilizante, donde la mezcla caliente se enfría, se granula, y luego se tamiza. El triple 16 tiene excelentes propiedades de manejo y almacenamiento.

La cantidad de insumos necesarios para producir una tonelada de fertilizante es de aproximadamente 0.4 toneladas de roca fosfórica, 0.2 toneladas de azufre (S) para disolver la roca, y 0.2 toneladas de potasio y nitrógeno. Cambios en la oferta o el precio de cualquiera de estos insumos tendrán un impacto en los precios y disponibilidad de dicho agente. El alto contenido de nutrientes del triple 16 es de gran ayuda en la reducción de los costos de manipuleo, transporte y aplicación. El triple 16 se produce en muchos lugares del mundo y es un producto ampliamente comercializado.

### **3.3.1.2. CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGENTE.**

El triple 16 es una formula química que se vende en el mercado de los fertilizantes. Lo que significa que por cada 100 kg contiene 16 unidades de Nitrógeno 16 unidades de Fosforo y 16 unidades de Potasio

PRESENTACION FÍSICA: sólido granulado, de color rosado      pH: Entre 7 y 8

Densidad a granel: promedio 886 kg/m<sup>3</sup>

Característica Fertilizante con altos contenidos de Nitrógeno, Fósforo y Potasio

Solubilidad en agua (30°C) 95 g/100 ml

Humedad crítica relativa (30°C) 50%

#### **GRANULOMETRÍA**

Tamiz TYLER No.	% Partículas
1. > 4mm	2.5
2. 4-3mm	36.0
3. 3-2mm	48.0
4. 2-1mm	12.0
5. <1mm	1.5

**Cuadro N° 1 Distribución granulométrica del agente Triple 16**

### 3.4. AGENTES QUÍMICOS CON ION CALCIO E ION SILICE.

#### 3.4.1. POLVO DE SILOI

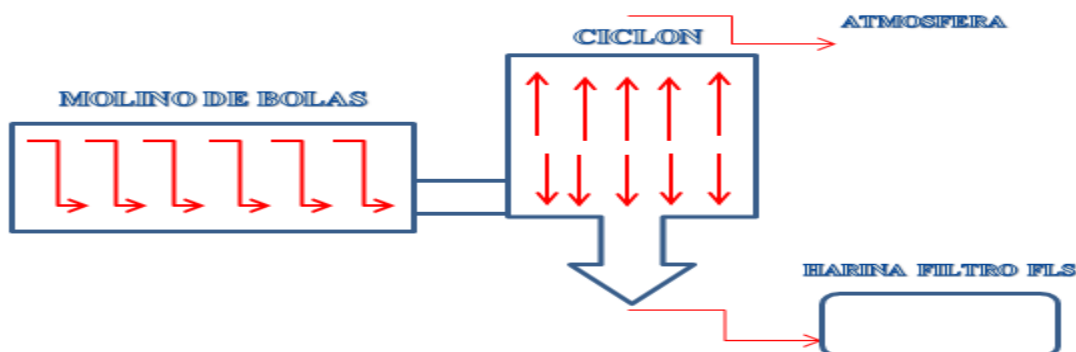


Ilustración 4 Proceso por el cual se obtiene el Polvo de silo.

#### 3.4.1.1. OBTENCIÓN DEL AGENTE.

Esta Harina de Filtro se la obtiene a través de un proceso que comienza en el molino de bolas donde es molido el material dolomita y piedra caliza, una vez realizado este proceso el material pasa a ser separado en el siguiente lugar llamado ciclón donde el material más pesado se deposita en el fondo y el material más liviano con características de un polvo muy liviano se va por la parte de arriba a la atmósfera cabe resaltar que este polvo no produce ninguna clase de contaminación en la atmosfera por eso es liberado libremente a la atmosfera.

#### 3.4.1.2. CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN DEL AGENTE.

PPF	33.36
SiO <sub>2</sub>	14.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.42
CaO	38.14
MgO	3.12
SO <sub>3</sub>	0.75
Cl <sup>-</sup>	0.45
Granulometría	
Retenido malla 325 = 0 %	
o sea que se pasa todo	

Fuente: Lab. De Soboce

Cuadro N° 2 Composición química del Polvo de silo.

### **3.5. MECANISMOS DE INTERACCIÓN ENTRE EL SUELO Y LOS AGENTES.**

#### **3.5.1. MECANISMOS DE INTERACCIÓN LIMO-AGENTE QUÍMICO.**

El mejoramiento observado en la pruebas aplicadas al suelo demostraron que al incorporar agentes químicos como son los fosfatos, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y sílice y considerando que los suelos de acuerdo a su composición que presentan definidos como suelos finos y que tienen como uno de sus componentes el limo en un 72 % además que posee una granulometría superior a las arcillas, nos permite establecer que al ser los limos partículas más angulosas que redondas presentan formas que pueden acomodarse y consolidarse aportando mayor resistencia al suelo, por su composición el limo es de carácter intermedio entre las areniscas y las lutitas o margas formadas por mezclas de arcillas con materiales calizos, aderezados con otros minerales como cuarzo o mica con trazas de materiales orgánicos, pues existen margas silíceas y margas caliza ( la mayoría contiene 50% o más de limo pero no son limolitas).

Limos son más ricos en sílice, más pobres en alúmina, óxido de potasio y agua que las lutitas, pero generalmente no tan ricos en sílice como las arenas más maduras. Cuando los limos están saturados con agua tienden a ser vivos y cuando se deshidrata y endurece puede convertirse en limolitas. Por esta descripción podemos esperar que el empleo de aditivos que contienen calcio, potasio, sodio, etc. así como la presencia de componentes aniónicos, fosfatos, carbonatos, silicatos, e iones presentes en el polvo de sílice permitirán que el suelo en presencia de agua modifique su acidez hacia un suelo levemente básico por la formación de los hidróxidos respectivos.

La incorporación de estos cationes y aniones al suelo van consolidando al suelo por que forman sales que luego de ser compactado el suelo y la deshidratación que acompaña a este proceso van cristalizando como carbonatos, silicatos, fosfatos, nitratos (en menor proporción) y este entrecruzamiento ayuda a aumentar la resistencia.

### 3.5.2. MECANISMOS DE INTERACCIÓN ARCILLA-AGENTE QUIMICO.

Las arcillas al contener dentro de su estructura componentes como la alúmina, sílice, ion calcio y varios compuestos más, que al ser mezcladas con los agentes químicos que son sujeto de nuestra investigación en la estabilización, lleguen a causar una interferencia en el proceso químico de las arcillas pudiendo causar una disminución del efecto que esperamos de mejora.

Así de esta manera que el porcentaje de agente químico que se vaya a combinar con la arcilla tendrá mucha influencia en el comportamiento de las arcillas por lo cual hay que considerar el siguiente efecto que se pueden presentar.

**El efecto actividad** es el proceso por el cual, al aumentar la concentración límite de agente químico, esto puede llegar a provocar una interferencia iónica, que se traducirá en un efecto negativo para el fin que queremos conseguir, por lo cual en vez de seguir aumentando la mejora en nuestro suelo arcilloso al incrementar el agente químico, este comenzara a disminuir.

$$A = F * C$$

A = COEFICIENTE ACTIVIDAD  
 F = COEFICIENTE DE ACTIVIDAD < 1  
 C = CONCENTRACIÓN DEL AGENTE QUÍMICO

Ecuación 1 Fórmula para el cálculo del coeficiente a de actividad

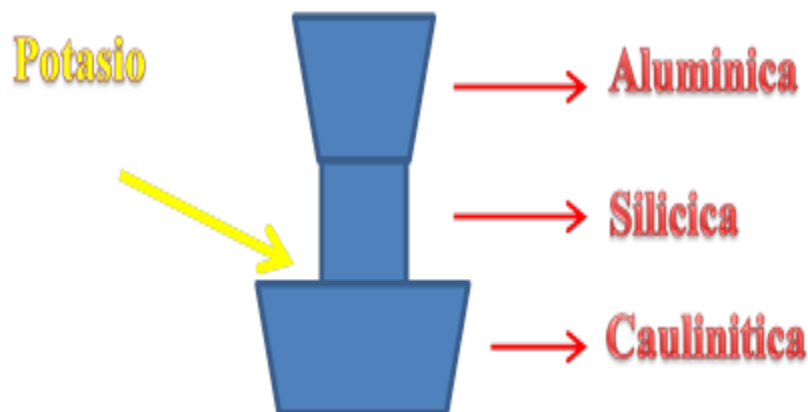


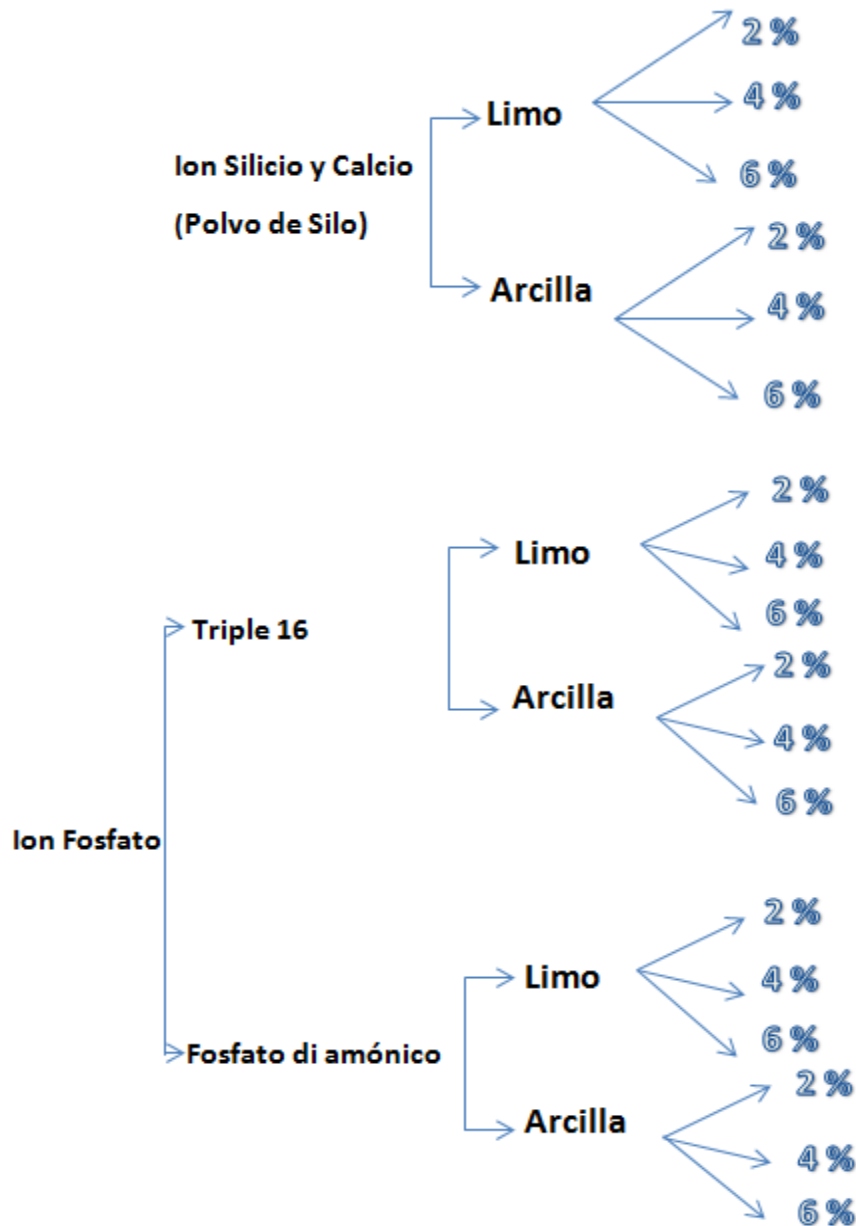
Ilustración 5 Proceso de interferencia iónica producida entre el agente químico-arcilla

### 3.6. ENSAYOS Y MEZCLAS A REALIZAR ENTRE EL SUELO FINO Y EL AGENTE QUIMÍCO.

Los ensayos que se harán con las mezclas Suelo-Agente químico serán las de:

- Prueba de proctor
- Ensayo de relación de soporte CBR.

Los cuales serán aplicados a las siguientes mezclas que se presenta a continuación:



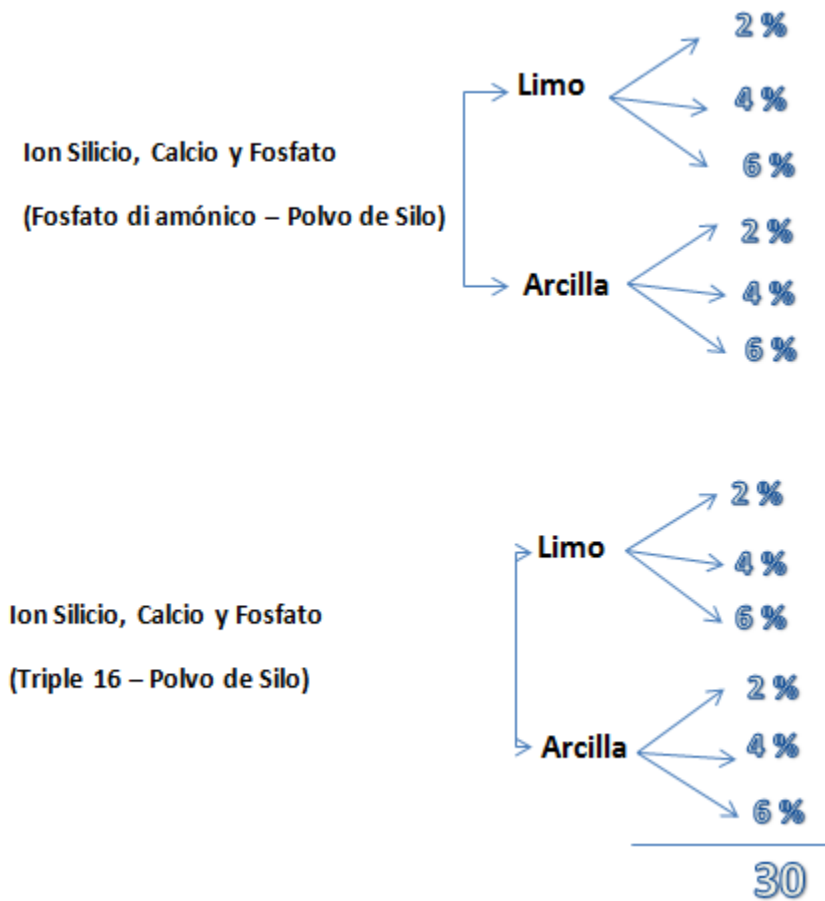


Ilustración 6 Ensayos a realizar Suelo – Agente químico

### 3.7. ANÁLISIS CIENTÍFICO

#### 3.7.1. MEDIA ARITMÉTICA.

Matemáticamente, la media aritmética se define como la suma de los valores observados dividida entre el número de observaciones.

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Ecuación 2 Fórmula para el cálculo de la media aritmética.

### 3.7.2. MEDIANA.

Divide la información en dos partes iguales, dejando igual número de datos por encima y por debajo de ella.

$$\text{Mediana} = Me = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}, \text{ si } n \text{ es impar ó}$$

Ecuación 3 Fórmula para el cálculo de la mediana para número de datos impares.

$$\text{Mediana} = Me = \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2}, \text{ si } n \text{ es par}$$

Ecuación 4 Fórmula para el cálculo de la mediana para número de datos impares.

### 3.7.3. MODA.

La moda, como su nombre lo indica, es el valor más común (de mayor frecuencia dentro de una distribución. Una información puede tener una moda y se llama unimodal, dos modas y se llama bimodal, o varias modas y llamarse multimodal. Sin embargo puede ocurrir que la información no posea moda.

### 3.7.4. DESVIACIÓN MEDIA.

La desviación media, mide la distancia absoluta promedio entre cada uno de los datos, y el parámetro que caracteriza la información.

$$DM = \frac{\sum_{i=1}^m |x_i - \bar{X}| f_i}{n}, \text{ donde}$$

$DM$ :	Desviación media
$x_i$ :	Diferentes valores de la variable X
$f_i$ :	Número de veces que se repite la observación $x_i$
$\bar{X}$ :	Media aritmética de la información
$n$ :	Tamaño de la muestra.
$m$ :	Número de agrupamientos o intervalos

Ecuación 5 Fórmula para el cálculo de la desviación media.

### 3.7.5. VARIANZA.

Numéricamente definimos la varianza, como desviación cuadrática media de los datos con respecto a la media aritmética.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{X})^2 f_i}{n}, \text{ donde:}$$

$S^2$  : Varianza  
 $x_i$  : Valor de la variable X  
 $\bar{X}$  : Media aritmética de la información  
 $f_i$  : Frecuencia absoluta de la observación  $x_i$   
 $n$  : Tamaño de la muestra.  
 $m$  : Número de agrupamientos o intervalos

Ecuación 6 Fórmula para el cálculo de la varianza.

### 3.7.6. MÁXIMOS.

Es el valor máximo que se puede encontrar en un conjunto de datos.

### 3.7.7. MÍNIMOS.

Es el valor mínimo que se puede encontrar en un conjunto de datos.

**CAPITULO IV**  
**APLICACIÓN PRÁCTICA**

	<b>Pagina</b>
4.1. Caracterización de los materiales finos (limo) a estabilizar.....	42
4.2. Caracterización de los materiales finos (arcilla) a estabilizar.....	45
4.3. Ion silicio y calcio (polvo de silo) empleada como estabilizante.....	48
4.3.1. Ensayos de laboratorio suelo fino (arcilla)-polvo de silo para porcentajes de agente químico de 6% - 4% y 2% .....	48
4.3.2. Ensayos de laboratorio suelo fino (limo)-polvo de silo para porcentajes de agente químico de 6% - 4% y 2% .....	50
4.4. Ion fosfato (fosfato di amónico) empleado como estabilizante.....	52
4.4.1. Ensayos de laboratorio suelo fino (arcilla)- fosfato di amónico para porcentajes de agente químico de 6% - 4% y 2% .....	52
4.4.2. Ensayos de laboratorio suelo fino (limo)- fosfato di amónico para porcentajes de agente químico de 6% - 4% y 2% .....	54
4.5. Ion fosfato (Triple 16) empleado como estabilizante.....	56
4.5.1. Ensayos de laboratorio suelo fino (arcilla) - triple 16 para porcentajes de agente químico de 6% - 4% y 2% .....	56
4.5.2. Ensayos de laboratorio suelo fino (limo)-triple 16 para porcentajes de agente químico de 6% - 4% y 2% .....	58
4.6. Ion silicio, calcio y fosfato (polvo de silo y fosfato di amónico) empleados como estabilizantes.....	60
4.6.1. Ensayos de laboratorio suelo fino (arcilla)-polvo de silo y fosfato di amónico para porcentajes de agente químico de 6% - 4% y 2% .....	60
4.6.2. Ensayos de laboratorio suelo fino (limo)-polvo de silo y fosfato di amónico para porcentajes de agente químico de 6% - 4% y 2% .....	62

4.7.	Ion silicio, calcio y fosfato (polvo de silo y triple 16) empleados como estabilizantes.....	65
4.7.1.	Ensayos de laboratorio suelo fino (arcilla)-polvo de silo y triple 16 para porcentajes de agente químico de 6% -4% y 2% .....	65
4.7.2.	Ensayos de laboratorio suelo fino (limo)-polvo de silo y triple16 para porcentajes de agente químico de 6% -4% y 2% .....	67
4.8.	Influencia de los porcentajes 6%-4% y 2% en las combinaciones suelo-agente quimico.....	69
4.9.	Influencia del costo en porcentajes de (6%, 10%, 14%, 18%, 22%) de cbr agente quimico-suelo.....	75
4.10.	Resumen de resultados .....	77
4.10.1.	Cracteristicas de los materiales para la estabilizar.....	77
4.10.2.	Suelo – polvo de silo.....	77
4.10.3.	Suelo – fosfato di amonico .....	78
4.10.4.	Suelo – triple 16.....	79
4.10.5.	Suelo – polvo de silo-fosfato di amonico .....	79
4.10.6.	Suelo - polvo de silo-triple 16.....	80
4.11.	Analisis estadístico (prueba de relación de soporte del suelo cbr).....	81
4.12.	Reporte fotografico.....	82

## CAPITULO IV

### APLICACIÓN PRÁCTICA

#### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES FINOS (LIMO) A ESTABILIZAR.

##### 4.1.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

El análisis granulométrico se lo realizo con una serie Normalizada de Tamices ASTM y AASTHO – T88 por el método del lavado sobre el tamiz 200.

Sobre materiales considerados representativos **Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1**

TAMIZ	% QUE PASA
3/8"	100
Nº4	100
Nº10	99.975
Nº40	99.795
Nº100	99.705
Nº200	99.485

**Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1 Resultados correspondientes a la granulometría del limo**

Está formado por materiales con características propias de los limos con una fracción inferior 25 micras de 99.48 %

Con la práctica del Hidrómetro se determinó, por su textura el porcentaje de materiales que se muestra en la **Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2** que son:

% Material	Descripcion
23	Arcilla
69	Limo
8	Arena fina

**Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2 Resultados correspondientes a la textura del material**

#### 4.1.2. LÍMITES DE ATTERBERG.

La determinación del Límite Líquido (NLT - 105) y del Límite Plástico (NLT - 106) efectuada sobre la muestra correspondiente al material limoso.

Se determinó los límites líquidos y plásticos de los materiales, encontrándose que los valores correspondientes a los limos son homogéneos y de baja plasticidad mostrados en la **Tabla** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..3.

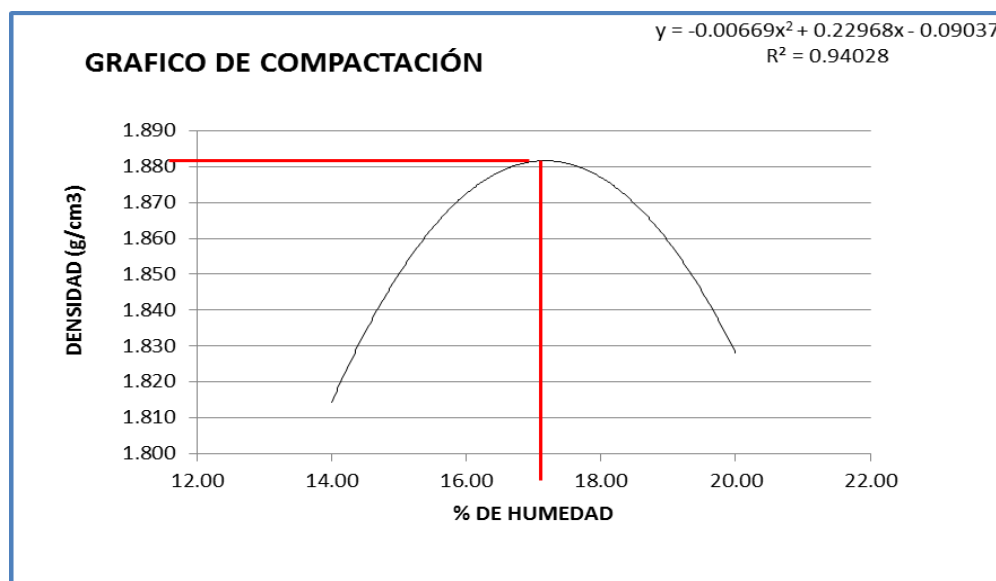
L.L. (%)	24
L.P. (%)	17
I.P. (%)	7

**Tabla** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..3 **Resultados correspondientes a la plasticidad de la muestra**

#### 4.1.3. PRUEBA DE PROCTOR

Antes de iniciar el proceso de compactación se realizan determinaciones de la humedad de elaboración mediante pequeñas porciones representativas de material a ser compactado.

Como se muestra en la **Figura N°** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1 las muestras de suelo a ser ensayadas en las pruebas para determinar la densidad máxima se elaboraron mediante compactación obteniendo los siguientes resultados.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1 resultados correspondientes a la compactación de la muestra limosa.**

#### **4.1.4. PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)**

A fin de conocer el valor soporte de la muestra limosa se llevaron a cabo ensayos CBR sobre muestras de suelo. Siendo uno de los objetivos de esta investigación la ejecución de ensayos sencillos, que puedan ser realizados en todos los laboratorios de suelos, se experimentó sobre moldes CBR con resultados mostrados en la .

El **hinchamiento o expansión** se determina sometiendo la muestra a un proceso de inmersión durante 4 días, aplicando una carga equivalente a la previsible en condiciones de uso de la carretera. Se efectuó la lectura al finalizar el proceso con un trípode debidamente calibrado. El hinchamiento adquiere una especial importancia en los suelos ya que pueden provocar asentamientos a valores elevados de expansión.

Los valores son al 95% de la densidad máxima mostrado en la **Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1**

<b>CBR SUELO PURO (%)</b>	<b>% EXPANSION</b>
4.7	1.8

**Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..4 Resultados correspondientes al CBR y a la expansión de la muestra de suelo saturada durante 4 días.**

Se observa que es un material poco expansivo y con un valor bajo de CBR por lo que necesita ser estabilizado.

#### **4.1.5. CLASIFICACIÓN AASHTO DE LAS MUESTRAS**

<b>UNIFICADA SUCS</b>	<b>AASHTO</b>
ML	A - 4

**Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5 Resultados de la clasificación de suelos de la muestra limosa por los métodos usuales.**

Como se puede apreciar en **Tabla** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5 en ambas clasificación el limo se integra en correspondiente:

Según SUCS “ML” y según AASTHO A-4 limo, arenas muy finas de baja compresibilidad además se aprecia que contiene un porcentaje apreciable de arcilla y arena fina

## **4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES FINOS (ARCILLA) A ESTABILIZAR.**

### **4.2.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

El análisis granulométrico se lo realizo con una serie Normalizada de Tamices ASTM y AASTHO – T88 por el método del lavado sobre el tamiz 200 mostrado en **Tabla** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..6.

<b>TAMIZ</b>	<b>% QUE PASA</b>
<b>3/8"</b>	100
<b>Nº4</b>	100
<b>Nº10</b>	97
<b>Nº40</b>	90.52
<b>Nº200</b>	83.06

**Tabla** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..6 **Grafica de resultados de la granulometría de las arcillas.**

Está formado por materiales con características propias de los limos con una fracción inferior 25 micras de 83.06 %

Con la práctica del Hidrómetro mostrada en la **Tabla** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..7 se determinó, por su textura el porcentaje de materiales que son:

<b>% Material</b>	<b>Descripcion</b>
60.2	Arcilla
34.1	Limo
5.7	Arena fina

**Tabla** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..7 **Resultados correspondientes a la textura del material**

#### 4.2.2. LÍMITES DE ATTERBERG.

La determinación del Límite Líquido (NLT - 105) y del Límite Plástico (NLT - 106) efectuada sobre la muestra correspondiente al material arcilloso.

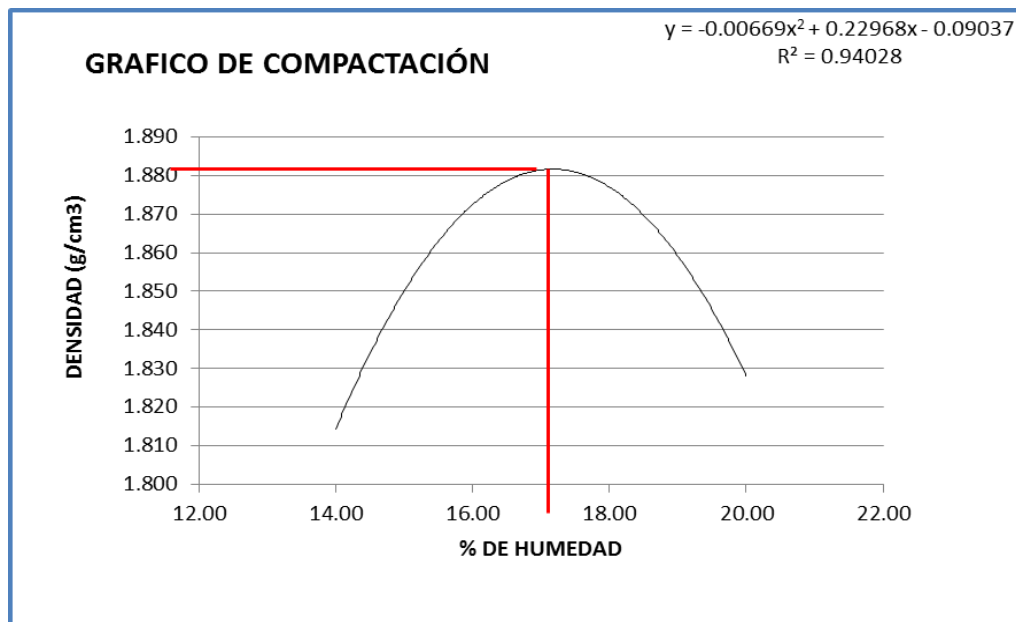
Se determinó los límites líquidos y plásticos de los materiales, encontrándose que los valores correspondientes a las arcillas son homogéneos y de baja plasticidad como se muestra en la **Tabla** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..8.

<b>L.L. (%)</b>	49
<b>L.P. (%)</b>	33
<b>I.P. (%)</b>	17

**Tabla** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..8 **Resultados correspondientes a la plasticidad de la muestra**

#### 4.2.3. PRUEBA DE PROTOR

Las muestras de suelo a ser ensayadas en las pruebas para determinar la densidad máxima se elaboraron mediante compactación obteniendo los siguientes resultados mostrados en la **Figura N°** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2.



**Figura N°** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2 **Resultados correspondientes a la compactación de la muestra arcillosa.**

#### 4.2.4. PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

Siendo uno de los objetivos de esta investigación la ejecución de ensayos sencillos, que puedan ser realizados en todos los laboratorios de suelos se experimentó sobre moldes CBR dicho ensayo.

El **hinchamiento o expansión** se determina sometiendo la muestra a un proceso de inmersión durante 4 días, aplicando una carga equivalente a la previsible en condiciones de uso de la carretera. Se efectuó la lectura al finalizar el proceso con un trípode debidamente calibrado. El hinchamiento adquiere una especial importancia en los suelos ya que pueden provocar asentamientos a valores elevados de expansión.

Los valores son al 95% de la densidad máxima **Tabla** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..9

CBR SUELO PURO (%)	% EXPANSION
4.9	3

**Tabla** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..9 **Resultados correspondientes al CBR y a la expansión de la muestra de suelo saturada durante 4 días.**

Se observa que es un material expansivo y con una valor bajo de CBR por lo que necesita ser estabilizado.

#### 4.2.5. CLASIFICACIÓN AASHTO DE LAS MUESTRAS

UNIFICADA SUCS	AASHTO
CL	A - 6 (10)

**Tabla** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..10 **Resultados de la clasificación de suelos de la muestra arcillosa por los métodos usuales.**

Como se puede apreciar en la **Tabla** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..10 en ambas clasificaciones la arcilla se integra en correspondiente:

Según SUCS “CL” y según AASTHO A-6 (10) arcilla inorgánica de baja plasticidad, además se aprecia que contiene un porcentaje muy apreciable de limo y arena fina.

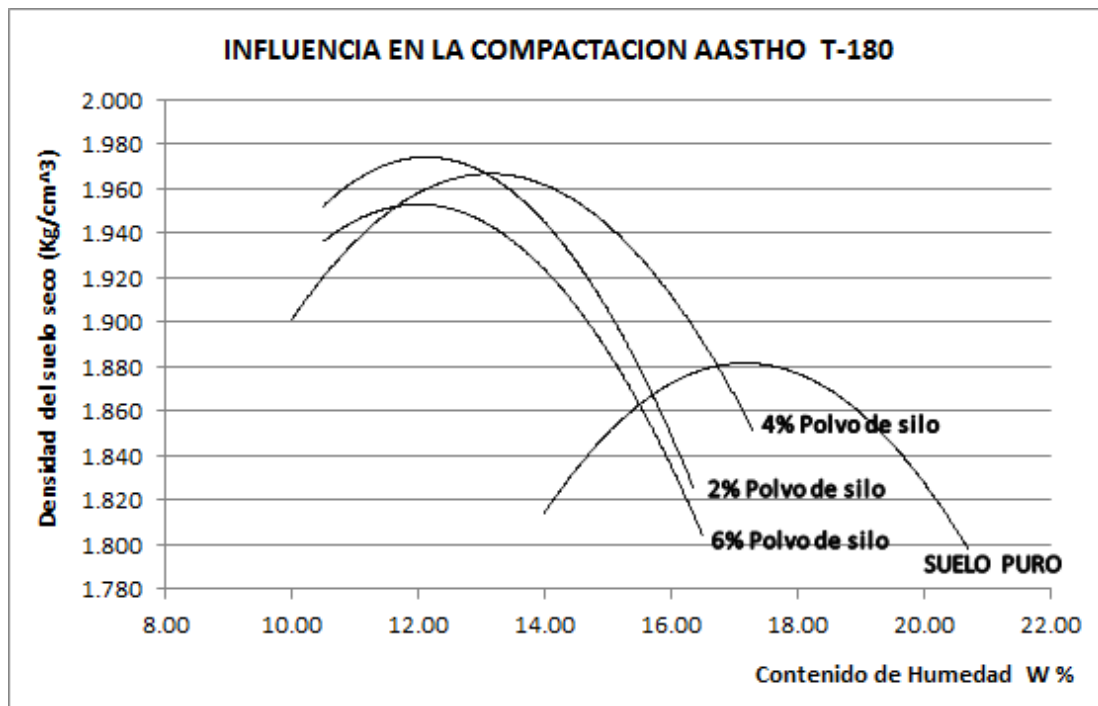
### 4.3. ION SILICIO Y CALCIO (POLVO DE SILO) EMPLEADA COMO ESTABILIZANTE

#### 4.3.1. ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (ARCILLA)-POLVO DE SILO PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% - 4% Y 2%

##### 4.3.1.1 PRUEBA DE PROCTOR

Como se puede observar en la **Figura N°** **;**Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**3** hay modificaciones producidas por el agente químico al aumentar el peso específico de las mezclas respecto al del suelo puro, por consiguiente va disminuyendo la humedad óptima.

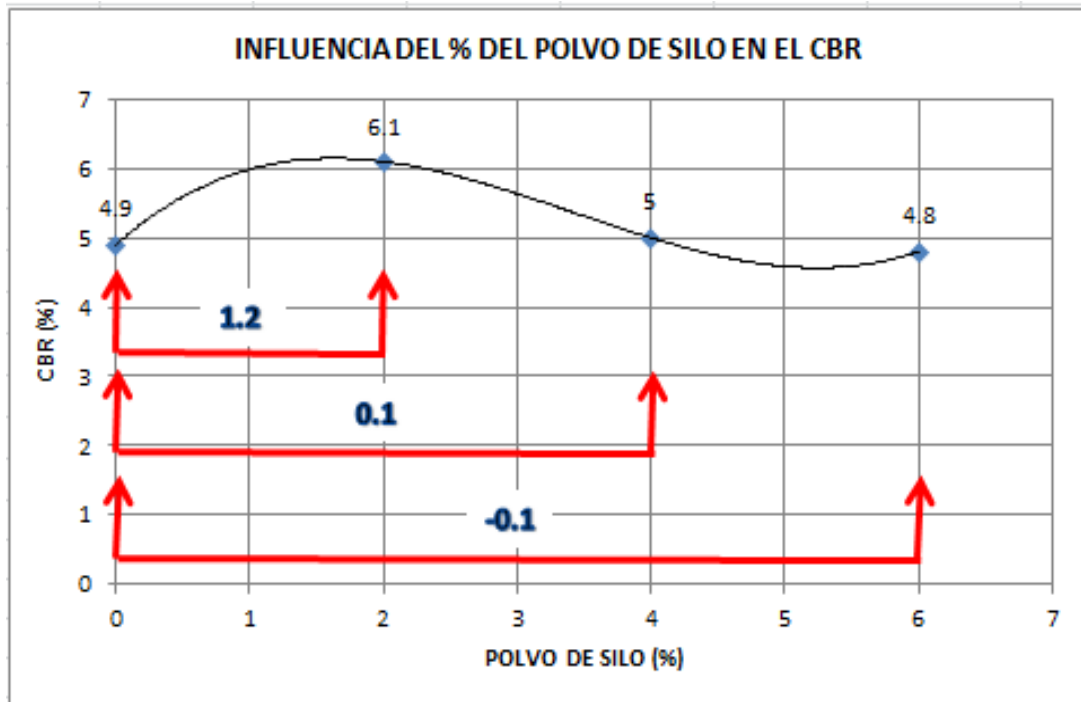
La densidad máxima va decreciendo a medida que se incrementa el contenido del polvo de silo.



**Figura N°** **;**Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**3** **Gráfica de la influencia del polvo de silo en la densidad máxima y la humedad óptima aplicadas en la arcilla.**

#### 4.3.1.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

En el CBR se debe tener en cuenta de hacer el mezclado cuidadosamente deshaciendo los grumos hasta que la mezcla obtenga un color uniforme para su posterior empleo.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..4 Grafica de la influencia del polvo de silo en el CBR y en la dispersión de datos con relación al suelo puro arcilloso**

Se observa en la **Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..4** que el CBR en presencia del polvo de silo, no tiene una modificación muy notoria cuando se utiliza mayor cantidad del agente químico, al contrario menor porcentaje de polvo de silo mayor porcentaje de CBR.

En el caso de la expansión se puede ver que a mayor adición del polvo de silo la expansión va disminuyendo de forma gradual lo que se muestra en la **Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5**

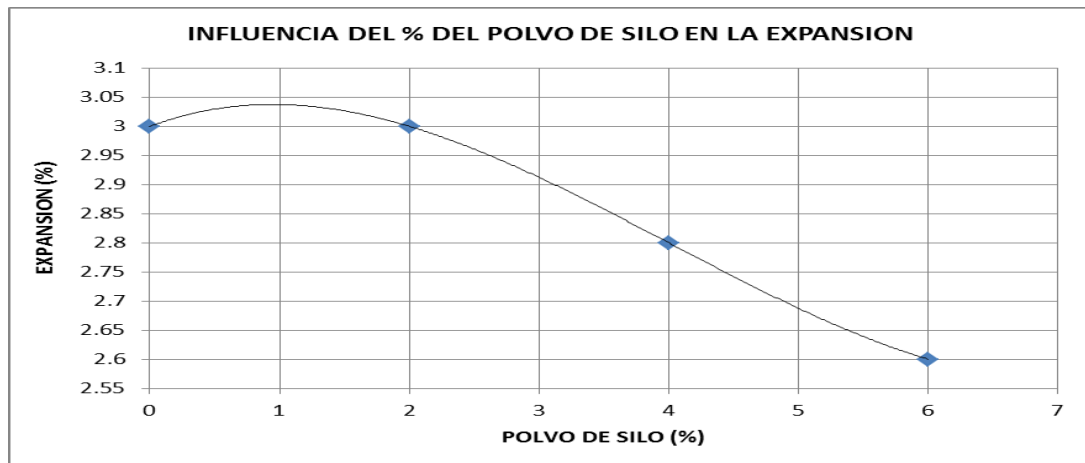


Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5 Grafica de la influencia del polvo de silo en la expansión con respecto al suelo puro arcilloso

#### 4.3.2 ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (LIMO)-POLVO DE SILO PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% - 4% Y 2%

##### 4.3.2.1 PRUEBA DE PROCTOR

Como se puede observar en la Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..6 hay una modificación notoria en la densidad máxima, conforme vamos disminuyendo el porcentaje del agente químico esta densidad va decreciendo más.

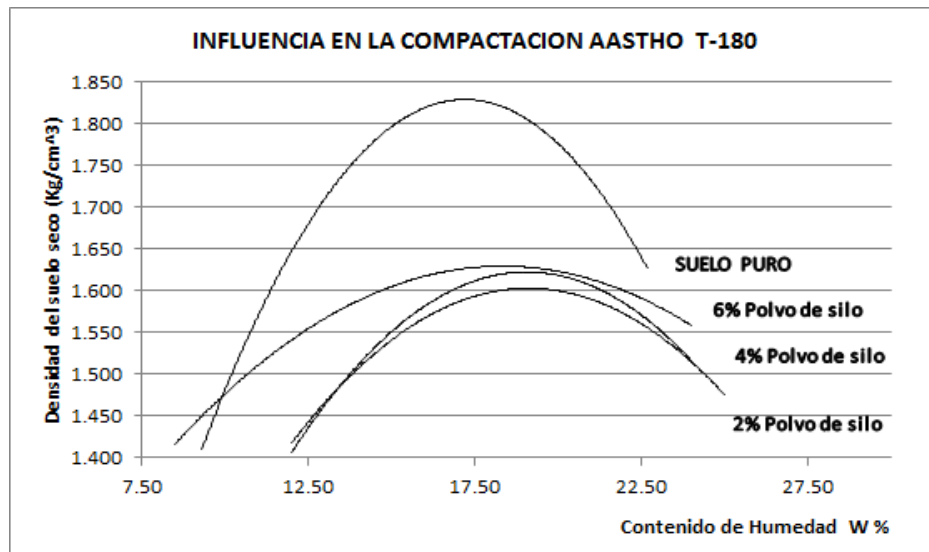


Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..6 Grafica de la influencia del polvo de silo en la densidad máxima y la humedad óptima aplicadas en los limos

#### 4.3.2.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

En la Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..7 se puede ver que según se incrementó el porcentaje de polvo de silo aumento nuestro porcentaje de CBR, resaltando también que esta modificación que se produce es muy significativa con relación al suelo no estabilizado.

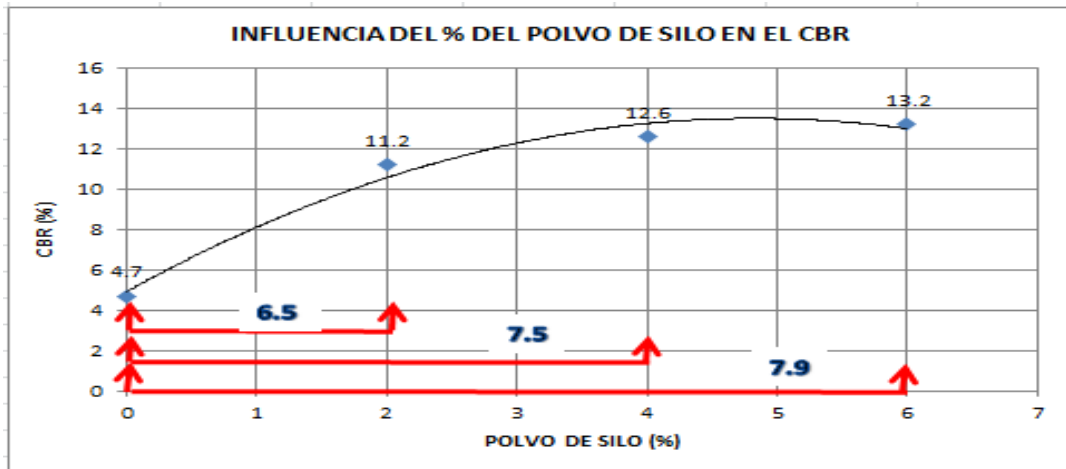


Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..7 Grafica de la influencia del polvo de silo del CBR y dispersión de datos con relación al suelo puro limoso

Inversamente es lo que sucede en el caso de la expansión Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..8 donde se puede observar que la expansión baja mientras más se incrementa el porcentaje de polvo de silo.

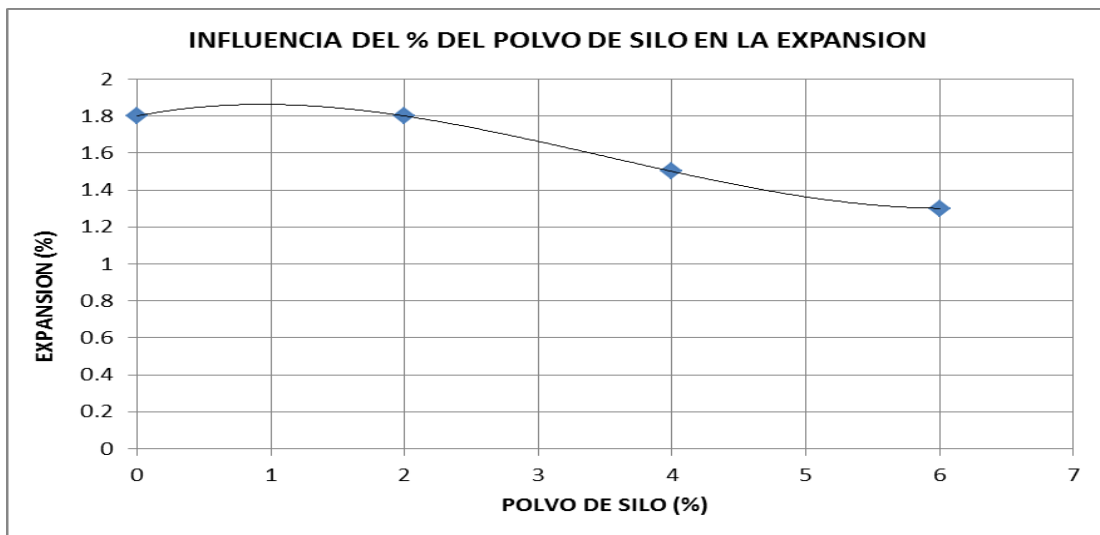


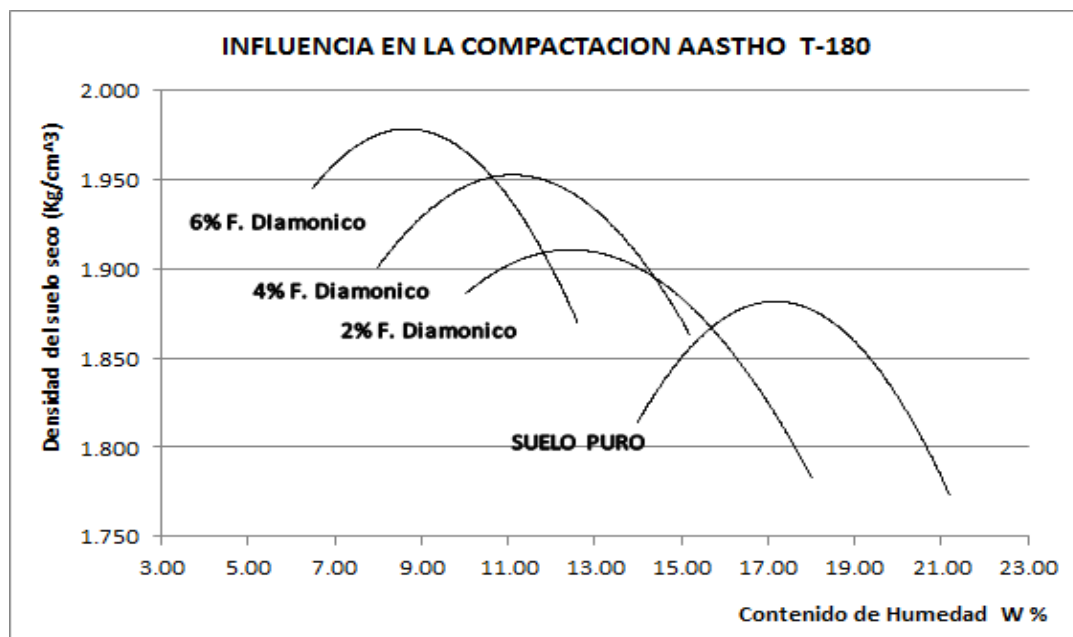
Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..8 Grafica de la influencia del polvo de silo en la expansión del suelo limoso

#### 4.4 ION FOSFATO (FOSFATO DI AMÓNICO) EMPLEADO COMO ESTABILIZANTE

##### 4.4.1 ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (ARCILLA)- FOSFATO DI AMÓNICO PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% - 4% Y 2%

###### 4.4.1.1 PRUEBA DE PROCTOR

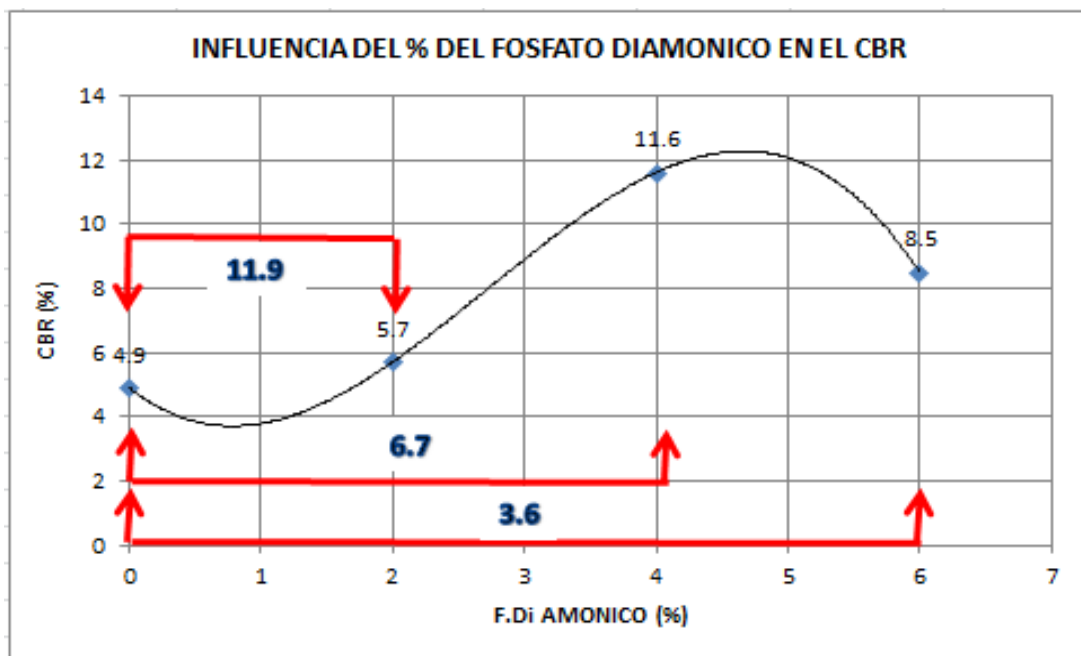
En el caso de este agente se puede observar en la **Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..9** que a diferencia del polvo de silo, la densidad máxima va aumentando en relación al suelo de forma gradual mientras vamos incrementando el porcentaje de polvo de silo esto debido a que dicho agente aparte de contener el ion fosfato contiene carbonatos de calcio que ayudan a disminuir la humedad óptima y por consiguiente elevar la densidad máxima del suelo arcilloso estabilizado.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..9 Grafica de la influencia del fosfato di amónico en la densidad máxima y la humedad óptima aplicadas en las arcilla**

#### 4.4.1.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

Esto también sucede en la prueba de CBR **Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..10** los componentes del fosfato di amónico al ser incorporados estos como cationes y aniones al suelo van consolidando al suelo por que forman sales que luego de ser compactado el suelo y la deshidratación que acompaña a este proceso van cristalizando como carbonatos, silicatos, fosfatos, nitratos este entrecruzamiento ayuda a aumentar la resistencia pero, por el efecto “actividad” explicado anterior mente, a la mayor adición del fosfato di amónico la resistencia decrece un poco.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..10 Grafica de la influencia del fosfato di amónico en el % de CBR y dispersión de datos respecto al suelo puro arcilloso**

El comportamiento de la expansión como se muestra en la figura **Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..11** nos muestra que subió un poco en el primer porcentaje ensayado, pero mientras incrementamos el porcentaje de fosfato di amónico nuestra expansión va disminuyendo.

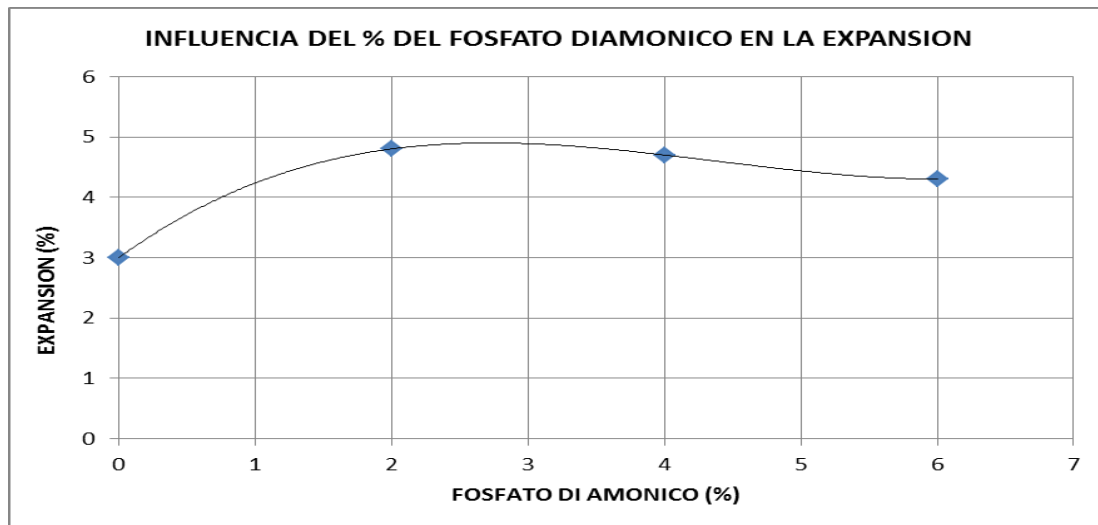


Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..11 Grafica de la influencia del fosfato di amónico en la expansión del suelo arcilloso

#### 4.4.2 ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (LIMO)- FOSFATO DI AMÓNICO PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% - 4% Y 2%

##### 4.4.2.1 PRUEBA DE PROCTOR

Los limos tratados con el fosfato di amónico al igual como sucedió con el agente químico polvo de silo, produjo una disminución considerable en la densidad, y está a la vez disminuye más mientras baja el porcentaje de agente químico..

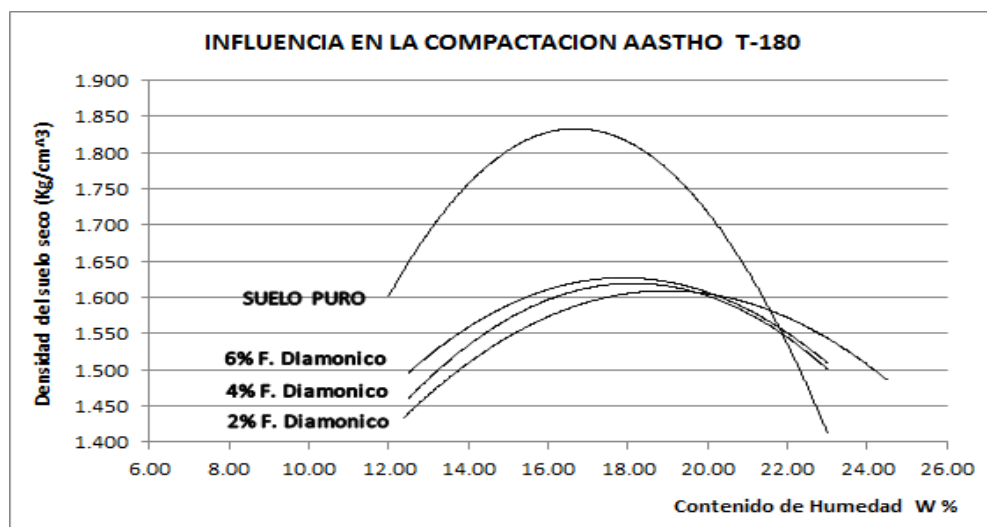


Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..12 Grafica de la influencia del fosfato di amónico en la densidad máxima y la humedad óptima aplicadas en los limos

#### 4.4.2.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

Este aumento de densidad máxima producido por el mayor incremento de fosfato di amónico, se traduce de igual forma en un incremento de porcentaje de CBR mientras más agente químico utilizamos.

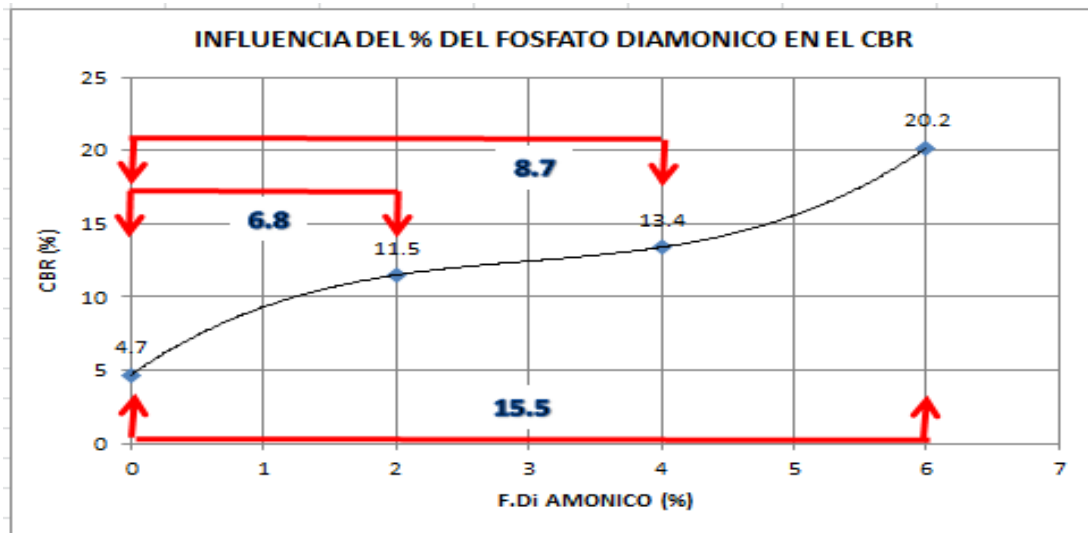


Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..13 Grafica de la influencia del fosfato di amónico en el % de CBR y dispersión de datos con respecto al suelo puro limoso

La expansión como se muestra en Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..14 sube un poco para después disminuir mientras se incrementa el porcentaje de agente químico.

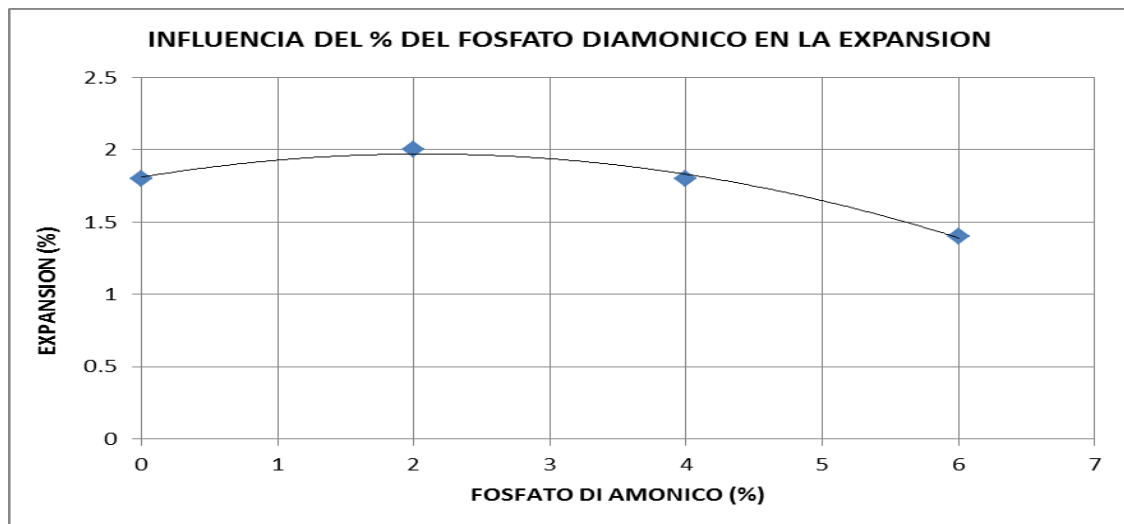


Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..14 Grafica de la influencia del fosfato di amónico en la expansión con respecto al suelo puro limoso

## ION FOSFATO (TRIPLE 16) EMPLEADO COMO ESTABILIZANTE

### 4.5 ION FOSFATO (TRIPLE 16) EMPLEADO COMO ESTABILIZANTE

#### 4.5.1 ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (ARCILLA) - TRIPLE 16 PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% - 4% Y 2%

##### 4.5.1.1 PRUEBA DE PROCTOR

En la figura N° se observa que hubo mejora en la densidad máxima de suelo puro que tiene resultados más satisfactorios con el menor porcentaje de triple 16 de ahí se observa un descenso en la densidad para luego volver a crecer con la mayor adición del agente químico.

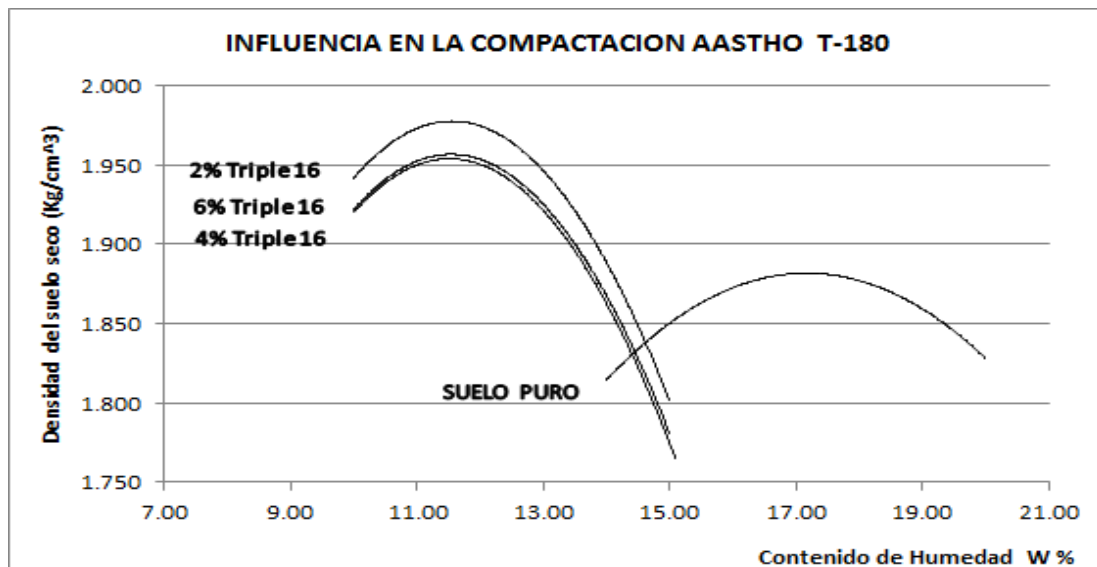
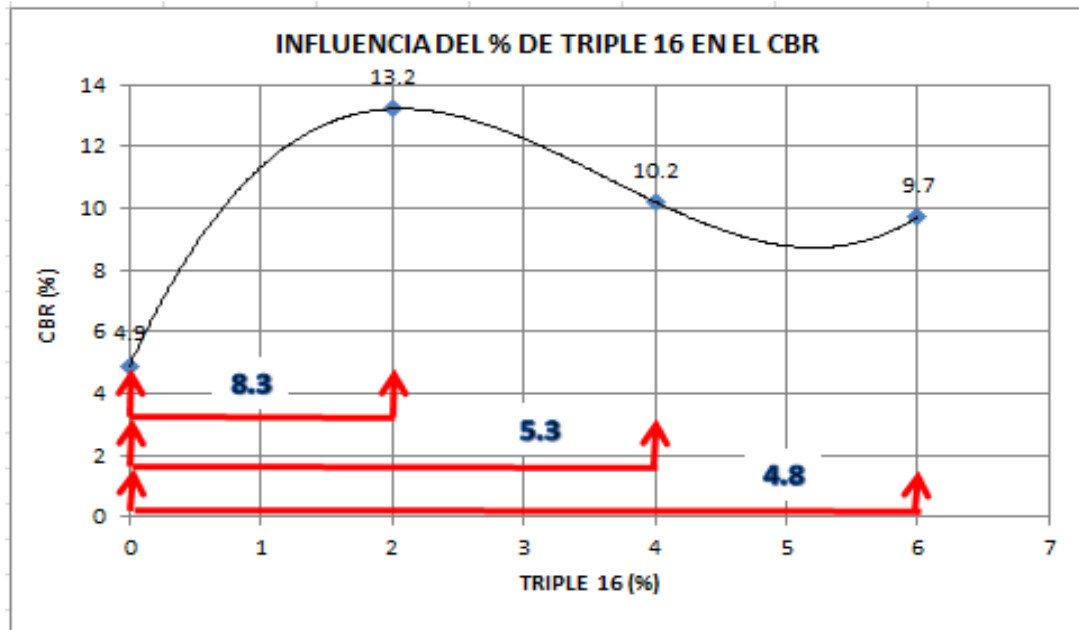


Figura N° *[Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..15* Grafica de la influencia del triple 16 en la densidad máxima y la humedad óptima aplicadas en las arcillas.

##### 4.5.1.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

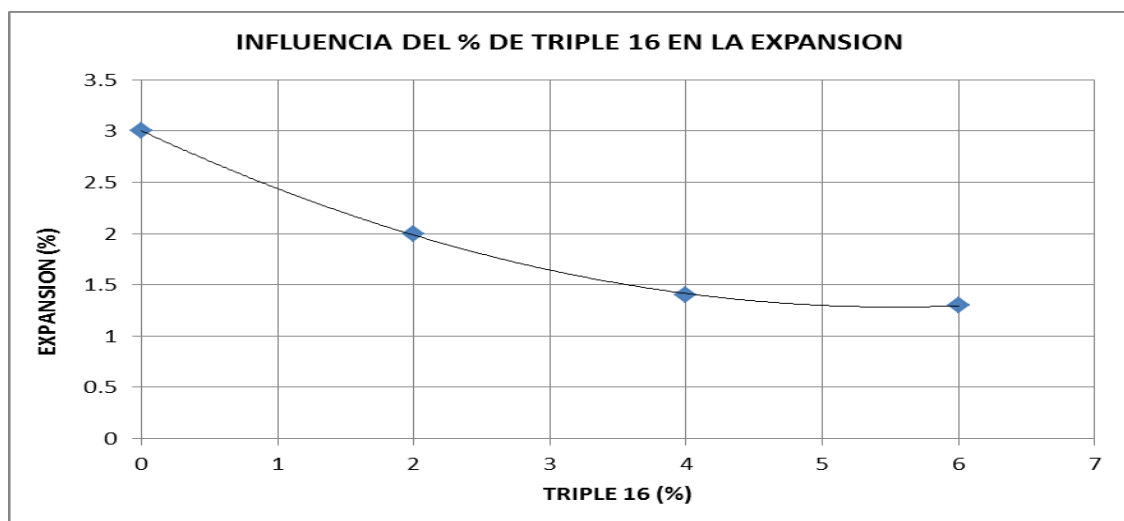
La figura N° nos refleja lo ocurrido en la compactación, quiere decir que la mayor mejora de porcentaje de CBR se la consiguió con el porcentaje menor de químico utilizado, para de ahí decrecer y volver a subir como se vio en la compactación, ocurriendo lo ya mencionado el efecto “actividad” esto se dio porque el triple 16

contiene además del ion fosfato, potasio que va a interrumpir el ciclo de las arcillas llegando a producir esta disminución de porcentaje de CBR.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..16 Grafica de la influencia del triple 16 en el % de CBR y la dispersión de datos con respecto al suelo puro arcilloso**

La expansión se comporta como se muestra en la Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..17 se puede apreciar que la expansión va decreciendo conforme aumentamos el porcentaje de agente químico.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..17 Grafica de la influencia del triple 16 en la expansión con respecto al suelo puro arcilloso**

#### 4.5.2 ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (LIMO)-TRIPLE 16 PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% - 4% Y 2%

##### 4.5.2.1 PRUEBA DE PROCTOR

En el caso de suelos limosos de igual forma como paso con los otros agentes químicos la densidad disminuyo considerablemente, notando también que la mayor adición del triple 16 favorece al aumento de la densidad máxima del suelo mezclado.

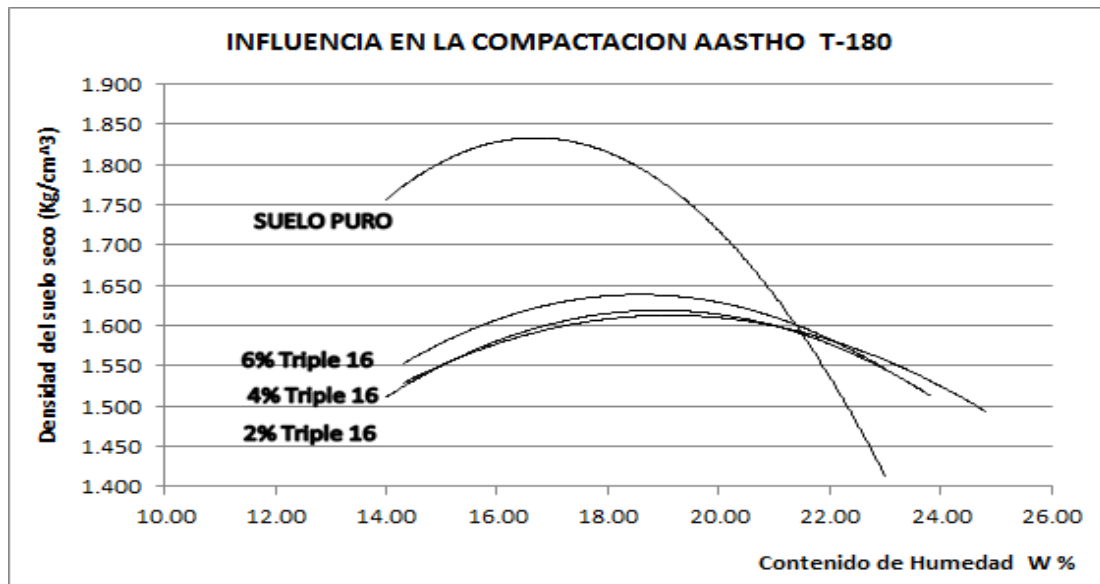
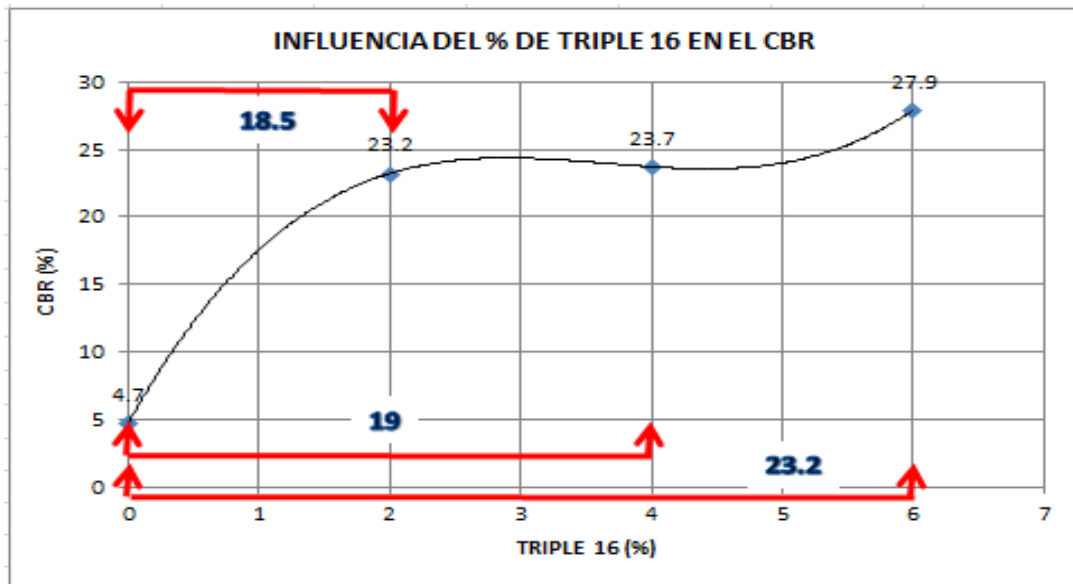


Figura N° ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..18 Grafica de la influencia del triple 16 en la densidad máxima y la humedad óptima aplicadas en los limos.

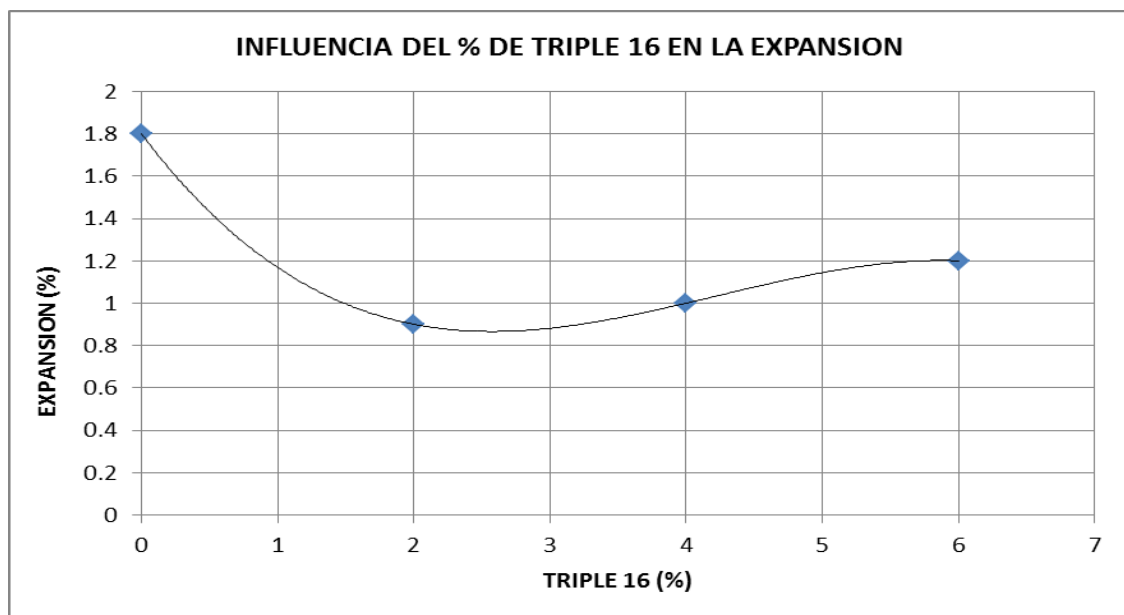
##### 4.5.2.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

Inversamente a lo ocurrido en la compactación el triple 16 mejora gradualmente el porcentaje de CBR del suelo, esto debido a que los limos son ricos en sílice pero poseen muy poca alúmina y óxido potasio, estos componentes químicos son proporcionados por este agente lo que hace que pueda ir aumentando la mejora de suelo conforme se proporciona más alúmina.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..19 Grafica de la influencia del triple 16 en el % de CBR y la dispersión de datos con respecto al suelo puro limoso**

La expansión como se muestra en la **Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..20** va aumentando conforme se incrementa el porcentaje de triple 16, esto pero sin dejar de mencionar que la expansión de nuestro suelo disminuyo en el primer porcentaje ensayado del 2% .



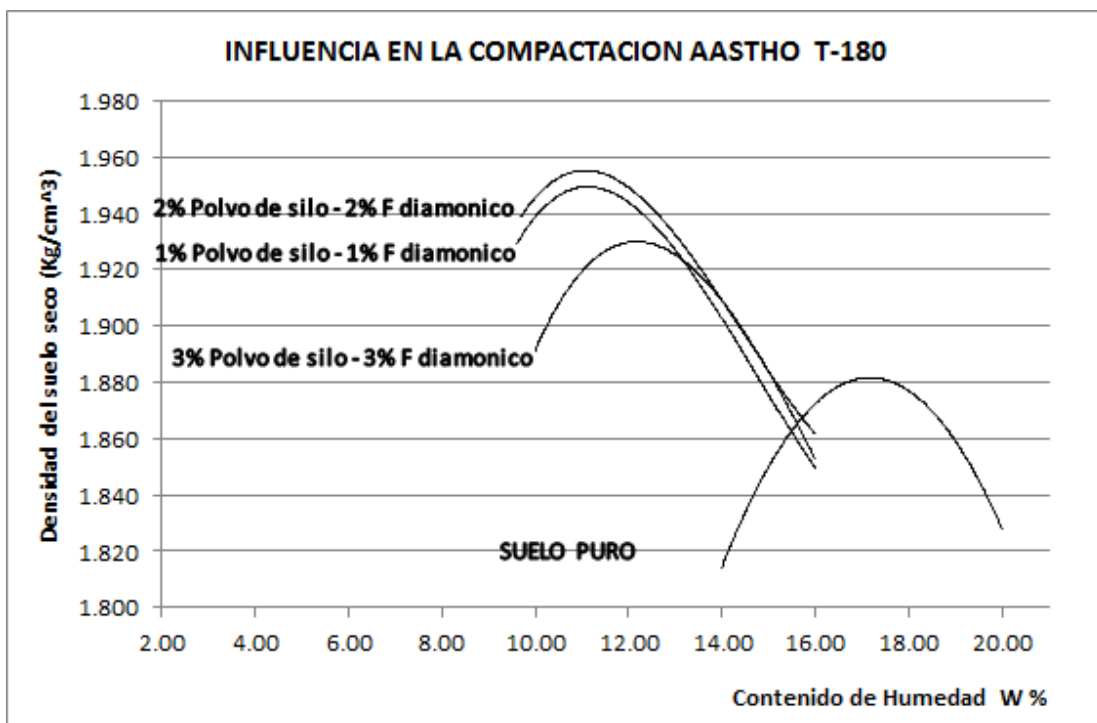
**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..20 Grafica de la influencia del triple 16 en la expansión con respecto al suelo puro arcilloso**

#### 4.6 ION SILICIO, CALCIO Y FOSFATO (POLVO DE SILO Y FOSFATO DI AMÓNICO) EMPLEADOS COMO ESTABILIZANTES

##### 4.6.1 ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (ARCILLA)-POLVO DE SILO Y FOSFATO DI AMÓNICO PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% - 4% Y 2%

###### 4.6.1.1 PRUEBA DE PROCTOR

Como se muestra en la figura N° al combinar el polvo de silo y el fosfato di amónico es decir el (ion calcio, ion sílice y el ion fosfato) se aprecia un aumento de la densidad máxima, de manera similar al de la utilización de un solo agente químico con el suelo puro, donde se nos vuelve a presentar el efecto “actividad” ya que la densidad aumenta al ir incrementando el agente químico en las dos primeras mezclas y la tercera decrece debido a la excesiva cantidad de agentes químicos.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..21 Grafica de la influencia del polvo de silo – fosfato di amónico en la densidad máxima y la humedad óptima aplicadas en las arcillas**

#### 4.6.1.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

Como se muestra en la figura N° es favorable como se esperaba la combinación del polvo de silo – fosfato di amónico (ion calcio, ion sílice y el ion fosfato) ya que se va aumentando gradualmente el porcentaje de CBR. Por esta descripción podemos esperar que el empleo de aditivos que contienen calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio, sodio, etc. así como la presencia de componentes amónicos fosfatos ( $\text{HPO}_4^{1-}$ ) carbonatos, silicatos y iones  $\text{NH}_4^+$  óxidos presentes en el polvo de sílice ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) permitirán que el suelo en presencia de agua modifique su acidez hacia un suelo levemente básico por la formación de los hidróxidos respectivos, y al deshidratarse van endureciendo.

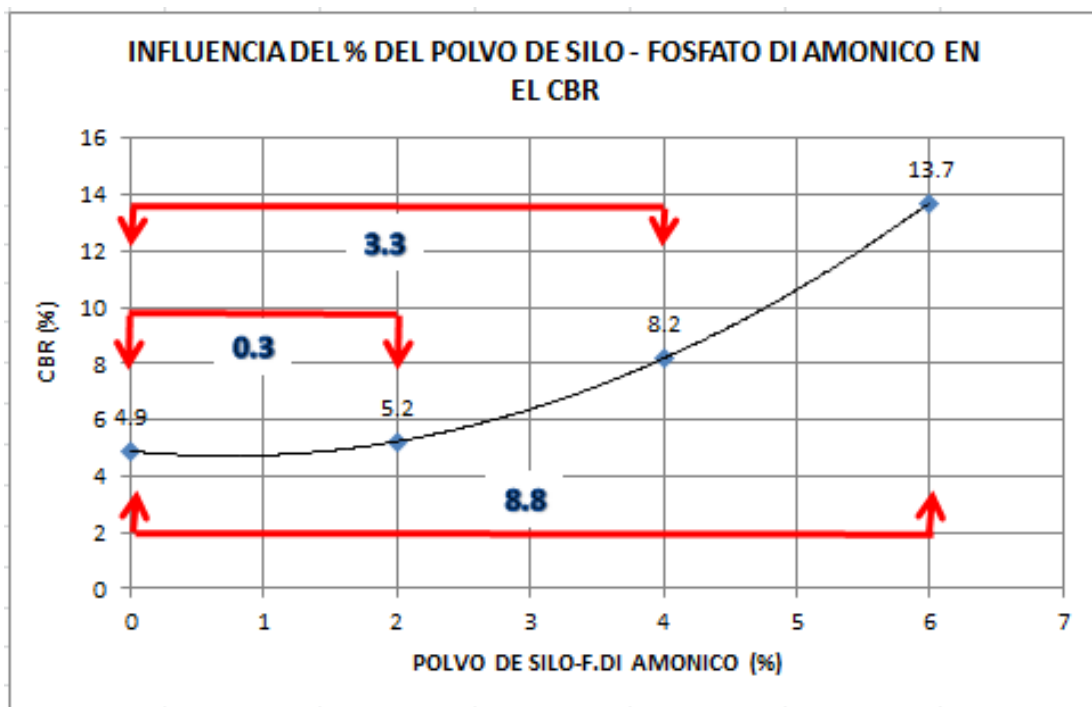


Figura N° ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..22 Grafica de la influencia del polvo de silo – fosfato di amónico en el % CBR y dispersión de datos con respecto al suelo puro arcilloso

La expansión aumenta en el primer porcentaje ensayado de 2% como se muestra en la Figura N° **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..23** pero al seguir incrementando el porcentaje de agente químico esta expansión va disminuyendo.

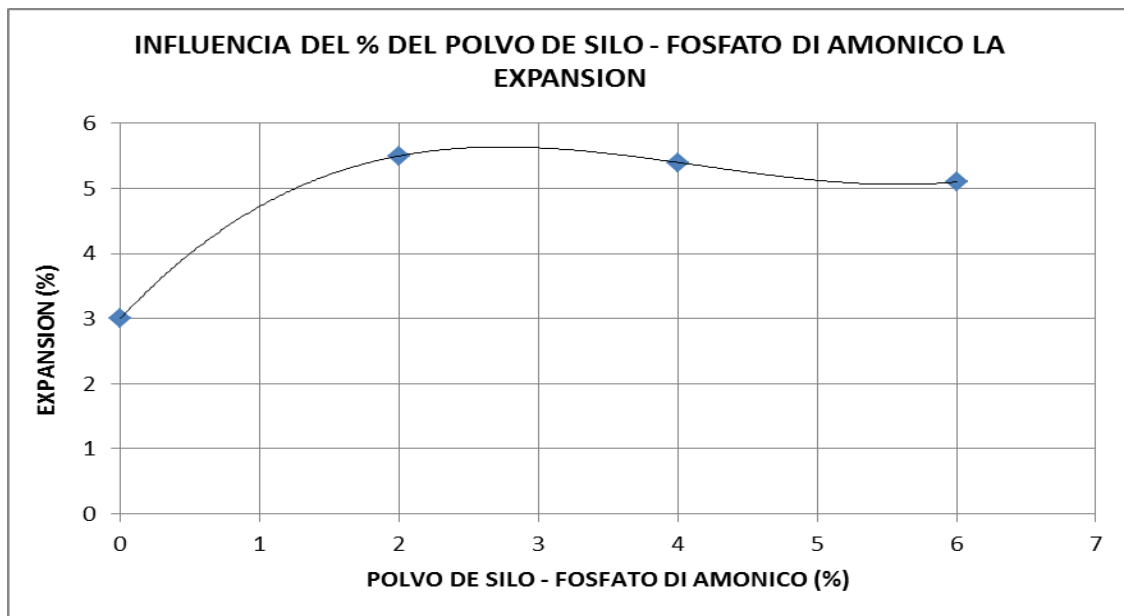


Figura N° **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..23** Grafica de la influencia del polvo de silo – fosfato di amónico en la expansión del suelo puro arcilloso

#### 4.6.2 ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (LIMO)-POLVO DE SILO Y FOSFATO DI AMÓNICO PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% - 4% Y 2%

##### 4.6.2.1 PRUEBA DE PROCTOR

De igual forma la combinación del polvo de silo – fosfato di amónico al igual que paso con las otras mezclas de agente químico-limo no favorece a la densidad máxima del suelo limoso, porque se nos presenta de nuevo una disminución de esta y por consiguiente un aumento de la humedad óptima del suelo limoso.

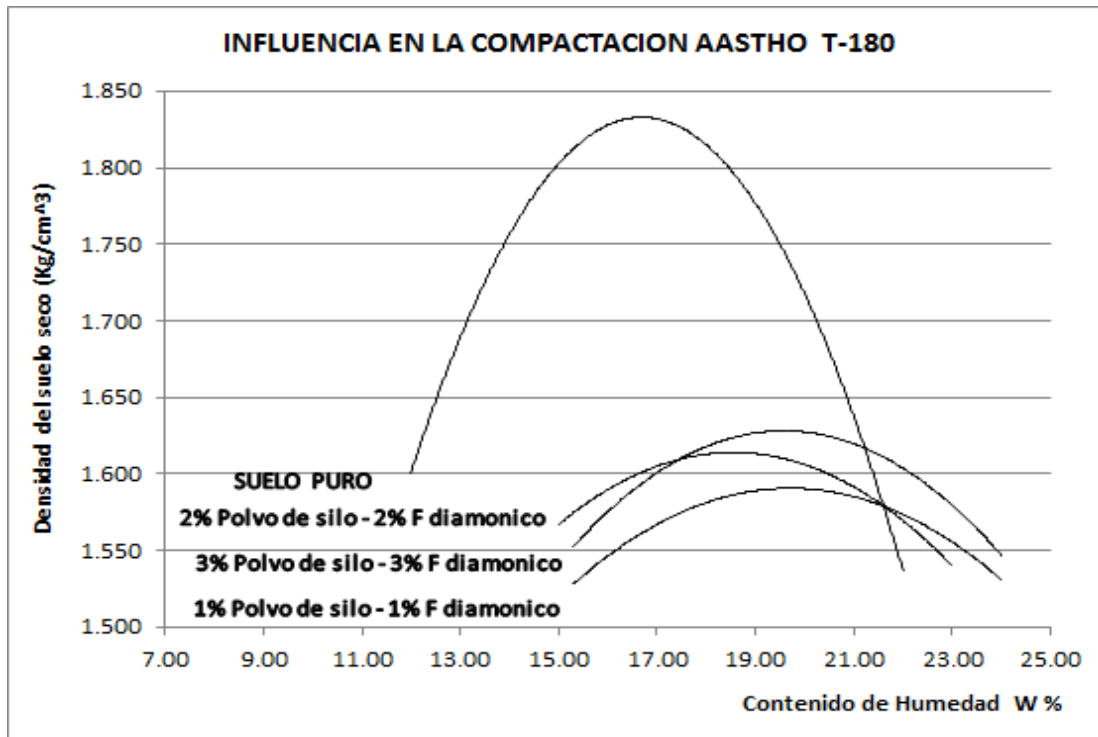
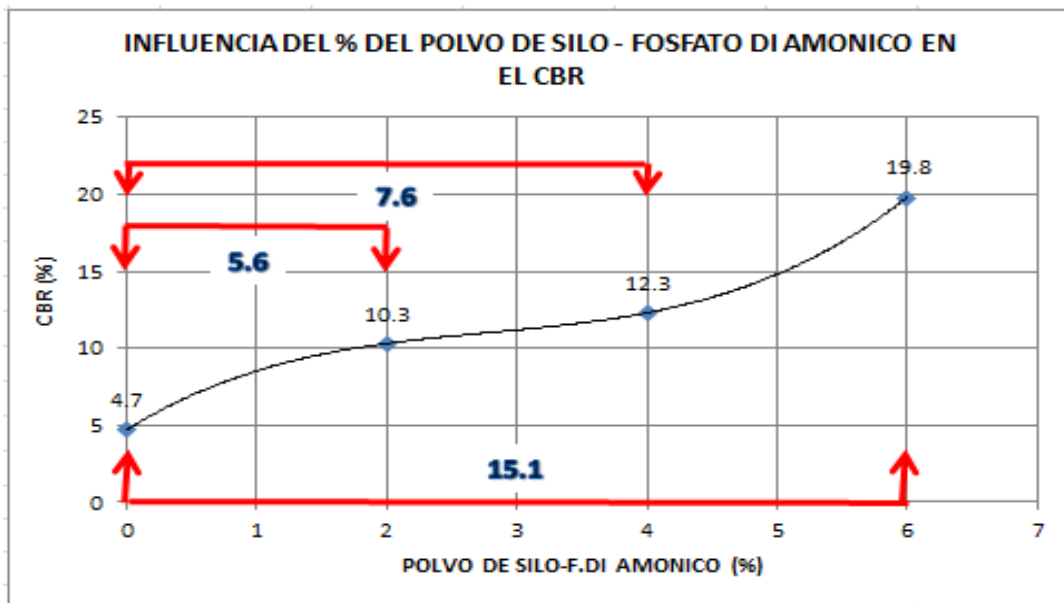


Figura N° **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..24** Grafica de la influencia del polvo de silo – fosfato di amonico en la densidad máxima y la humedad óptima aplicadas en los limos.

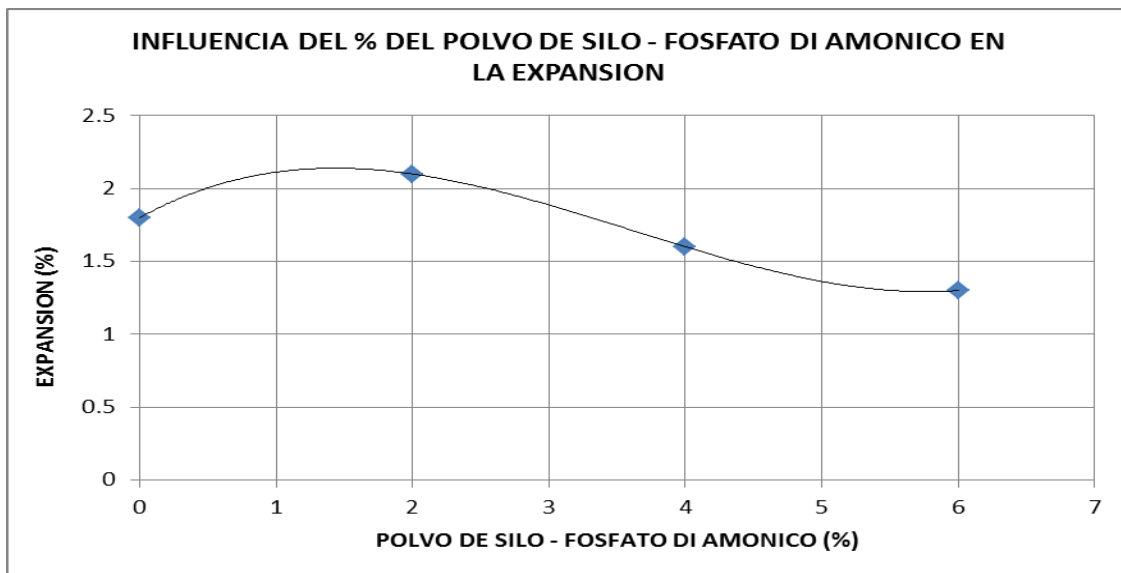
#### 4.6.2.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

Hay un cambio favorable como se muestra en la Figura N° **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..25** del porcentaje de CBR, mas todavía mientras se van incrementando los porcentajes, esta mejora se produce porque al incorporar agentes químicos como son los fosfatos,, fosforo, potasio, calcio y sílice y considerando que los suelos de acuerdo a su composición que presentan y tienen como uno de sus componentes el limo en un mayor al 65 % nos permite establecer que al ser los limos partículas más angulosas que redondas presentan formas que pueden acomodarse y consolidarse aportando mayor resistencia al suelo.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..25 Grafica de la influencia del polvo de silo – fosfato di amónico en el % de CBR y dispersión de datos con respecto al suelo puro limoso**

En la Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..26 se puede observar que la expansión aumenta en el primer porcentaje, pero va decreciendo conforme aumentamos el porcentaje de los agentes químicos utilizados, de lo que se puede decir que a dichas mezclas ayudan a reducir la expansión mientras más se las incrementa el agente químico.



**Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..26 Grafica de la influencia del polvo de silo – fosfato di amónico en la expansión del suelo puro limoso**

## 4.7 ION SILICIO, CALCIO Y FOSFATO (POLVO DE SILO Y TRIPLE 16) EMPLEADOS COMO ESTABILIZANTES

### 4.7.1 ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (ARCILLA)-POLVO DE SILO Y TRIPLE 16 PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% -4% Y 2%

#### 4.7.1.1 PRUEBA DE PROCTOR

En la Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..27 se puede apreciar que esta combinación de polvo de silo – triple 16 actúa de forma inversa a la anterior combinación polvo de silo – fosfato di amónico, ya que mientras aumentamos la dosificación de los agentes químicos nuestras densidades máximas van decreciendo.

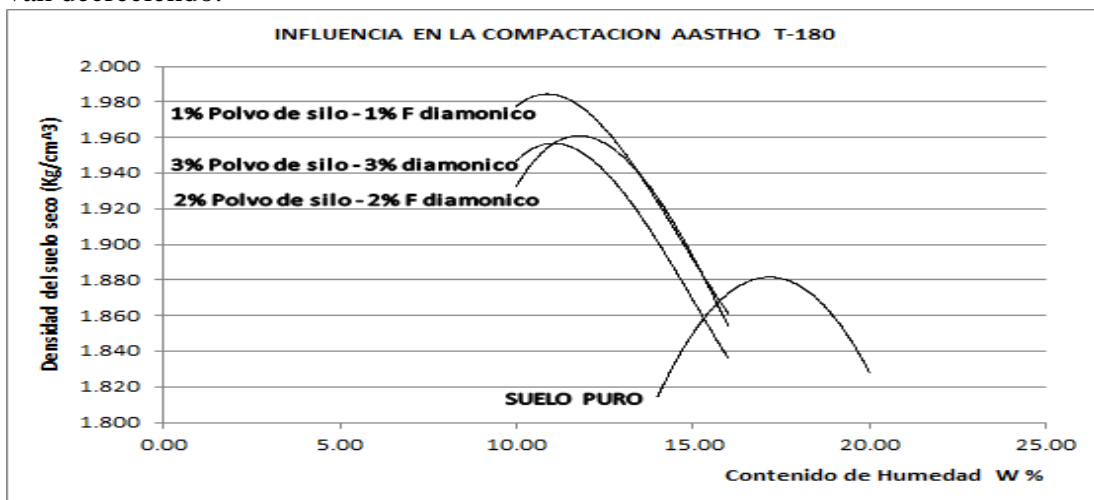


Figura N° ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..27 Grafica de la influencia del polvo de silo – triple 16 en la densidad máxima y la humedad optima aplicadas en las arcillas

#### 4.7.1.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

En la figura N° se muestra como se modifica favor ablenente el porcentaje de suelo con relación al suelo puro, además que esta mejora seba incrementando conforme vamos aumentando la dosificación de los agentes químicos, puede decirse que esta mejora se debe a la incorporar agentes químicos como son los fosfatos, nitrógeno, fosforo, potasio, calcio y sílice que actúan a favor de la mejora del suelo arcilloso.

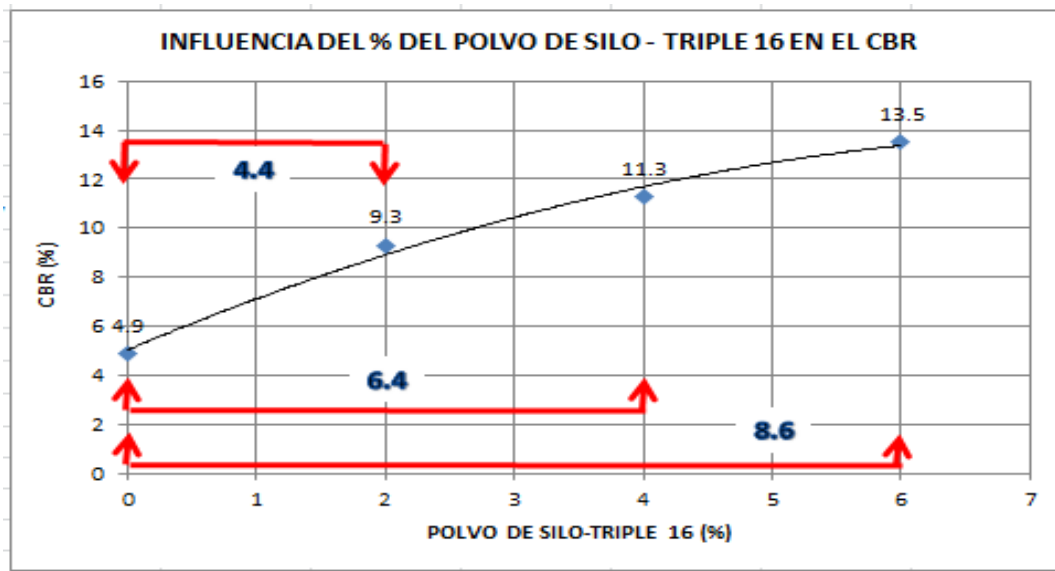


Figura N° **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..28** Grafica de la influencia del polvo de silo – triple 16 en el % de CBR y dispersión de datos con respectó al suelo puro arcilloso

La expansión como se muestra en la Figura N° **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..29** acompaña al comportamiento de CBR ya que mientras va aumentando el CBR inversamente la expansión va disminuyendo, notando que la combinación del polvo de silo – triple 16 le da a la arcilla mayor homogeneidad en su comportamiento del CBR como de la expansión.

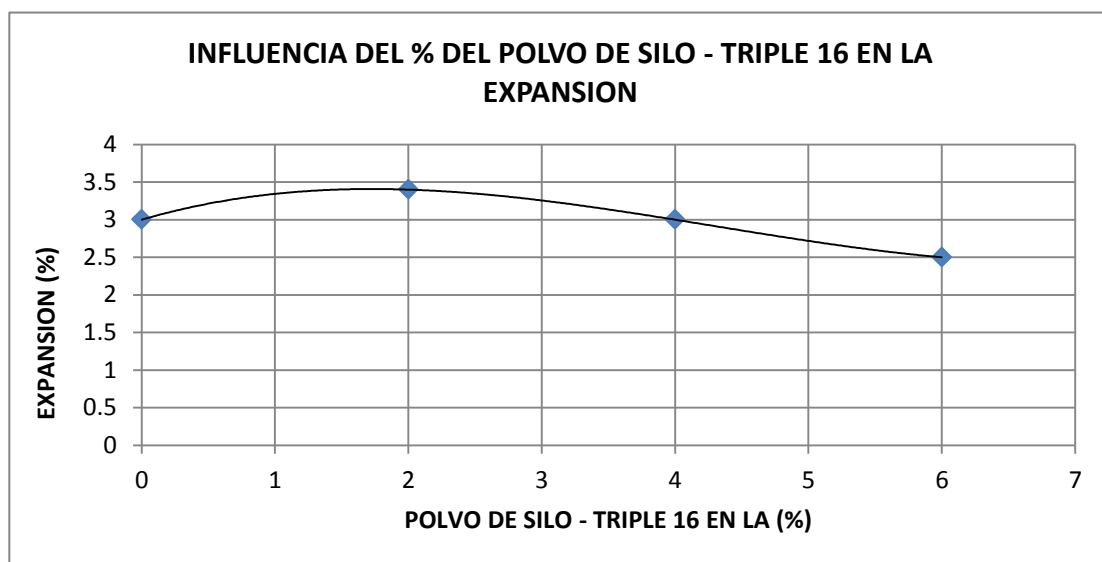
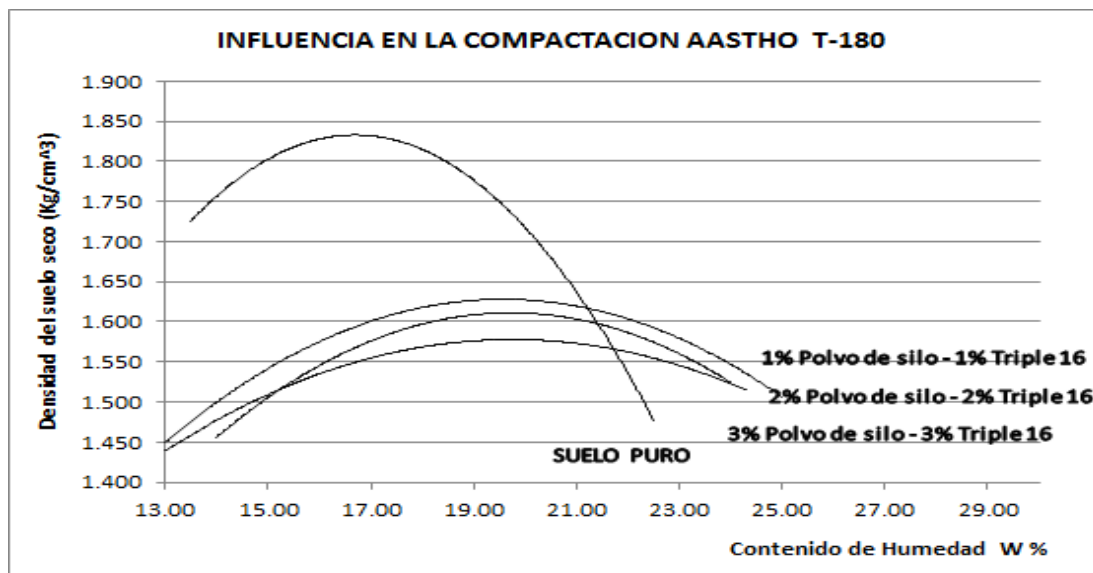


Figura N° **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..29** Grafica de la influencia del polvo de silo – triple 16 en la expansión del suelo puro arcilloso

## 4.7.2 ENSAYOS DE LABORATORIO SUELO FINO (LIMO)-POLVO DE SILO Y TRIPLE 16 PARA PORCENTAJES DE AGENTE QUÍMICO DE 6% -4% Y 2%

### 4.7.2.1 PRUEBA DE PROCTOR

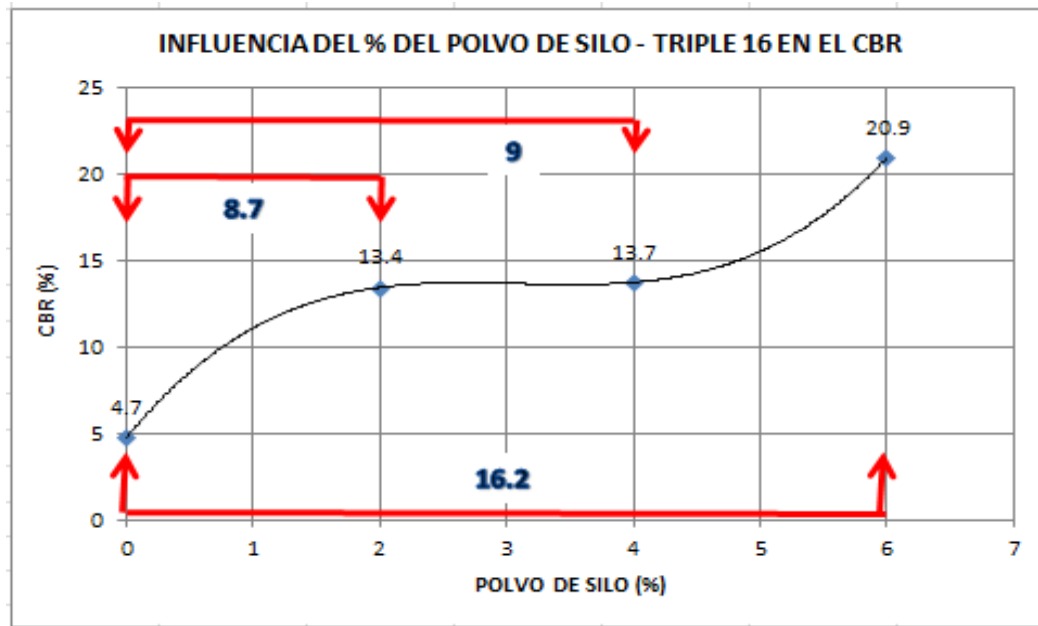
De forma contraria de lo que pasa con las arcillas como se muestra en la **Figura N°** **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..30** se puede observar que nuestra densidad máxima disminuyó fuertemente para la primera mezcla ensayada, así también sigue disminuyendo conforme se aumentó la dosificación de agente químico a la mezcla.



**Figura N°** **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..30** Grafica de la influencia del polvo de silo – triple 16 en la densidad máxima y la humedad óptima aplicadas en los limos.

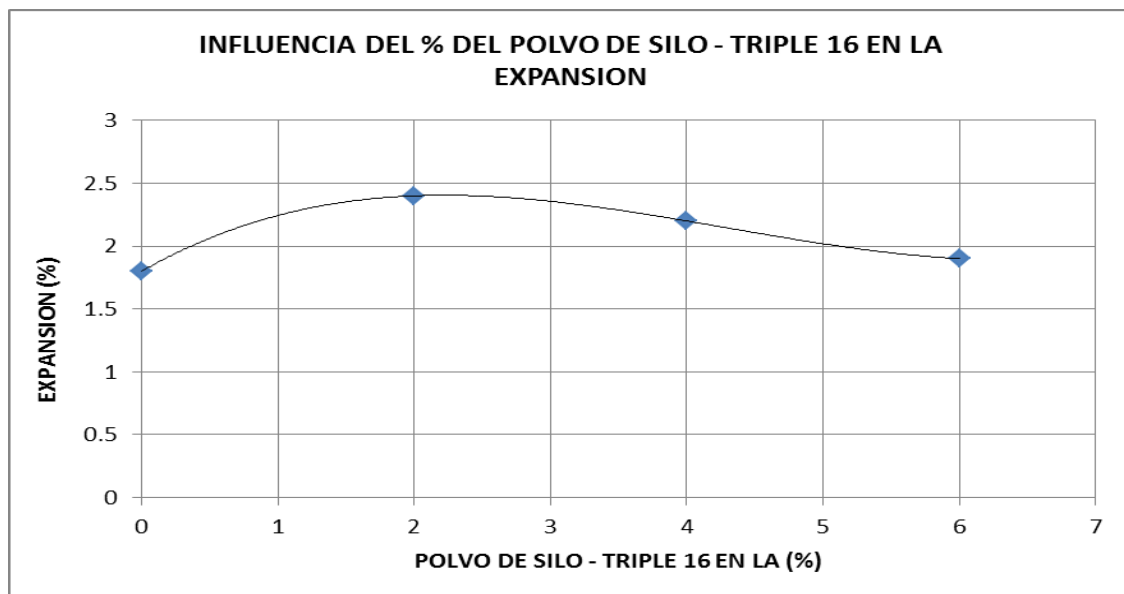
### 4.7.2.2 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO (CBR)

Como se puede ver en la **Figura N° 4.32** el porcentaje de CBR va incrementando favorablemente mientras se va a incrementando la dosificación de los agentes químicos ya que estos contienen fosfatos, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y sílice, que ayudan a los limos que son más ricos en sílice, pero más pobres en alúmina, óxido de potasio y agua que las lutitas. Cuando los limos están saturados con agua tienden a ser vivos y cuando se deshidrata y endurece puede convertirse en limolita.



**Figura N°** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..31 **Grafica de la influencia del polvo de silo – triple 16 en el % de CBR y dispersión de datos con respecto al suelo puro limoso**

En lo referente a la expansión hubo un incremento, pero como se puede apreciar en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ese incremento a medida que aumenta el de agente químico va reduciendo la expansión, lo que va a ayuda a un mejor incremento de igual forma en el porcentaje del CBR.



## 4.8 INFLUENCIA DE LOS PORCENTAJES 6%-4% Y 2% EN LAS COMBINACIONES SUELO-AGENTE QUIMICO.

### 4.8.1 AGENTES QUÍMICOS-ARCILLA AL (6%)

Como se puede observar en la Figura N° 4.32 hubo un mayor aumento de CBR para la combinación de POLVO DE SILO-FOSFATO DI AMÓNICO, incrementándose un 8.8% con relación al de CBR de la arcilla, luego le siguen TRIPLE 16 y el POLVO DE SILO-TRILE 16 con un incremento de igual proporción de 8.6%, después sigue el FOSFATO DI AMÓNICO con un incremento de 0.8% y por ultimo hubo un leve deterioro del % de CBR en la utilización del POLVO DE SILO bajando -0.1 con relación al CBR de la arcilla pura.

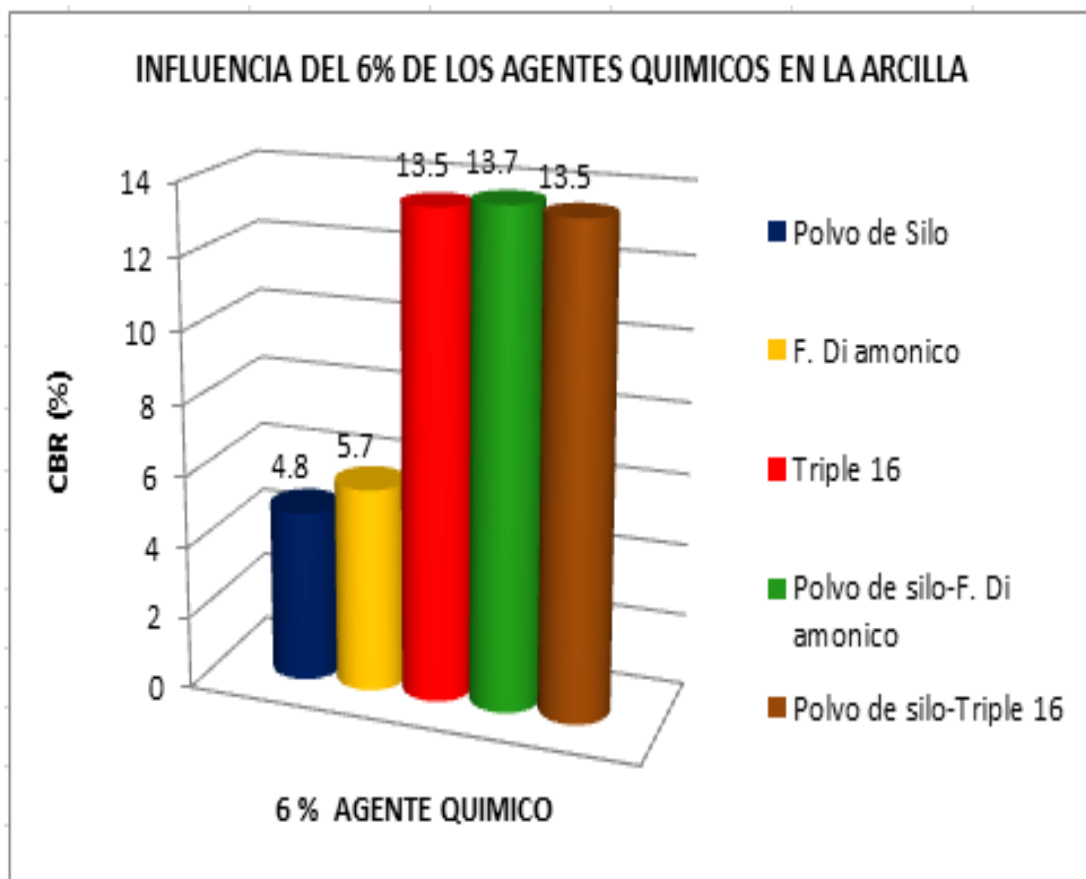
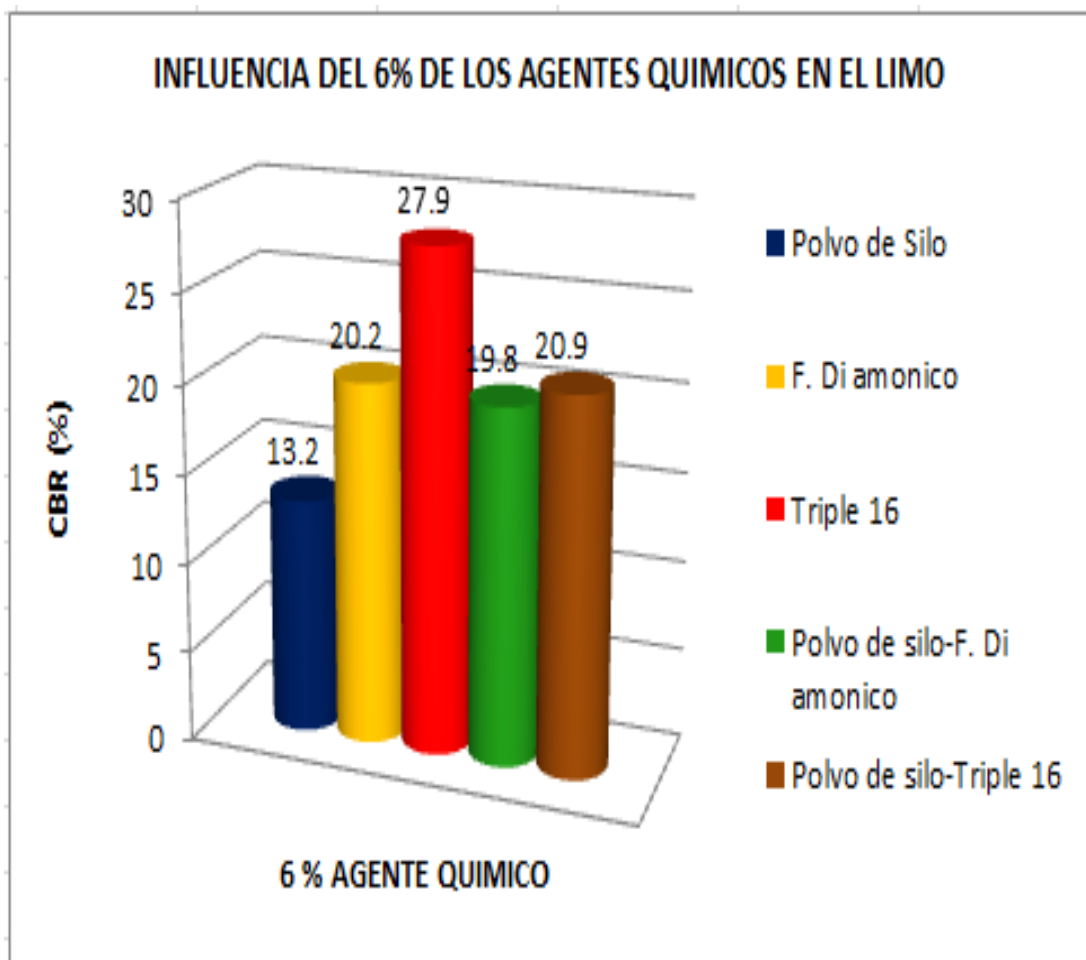


Figura N° 4.32 Gráfica del comportamiento de los agente químicos al 6 % en los CBR entre el Agente químico-Suelo arcilloso

#### 4.8.2 AGENTES QUÍMICOS-LIMO AL (6%)

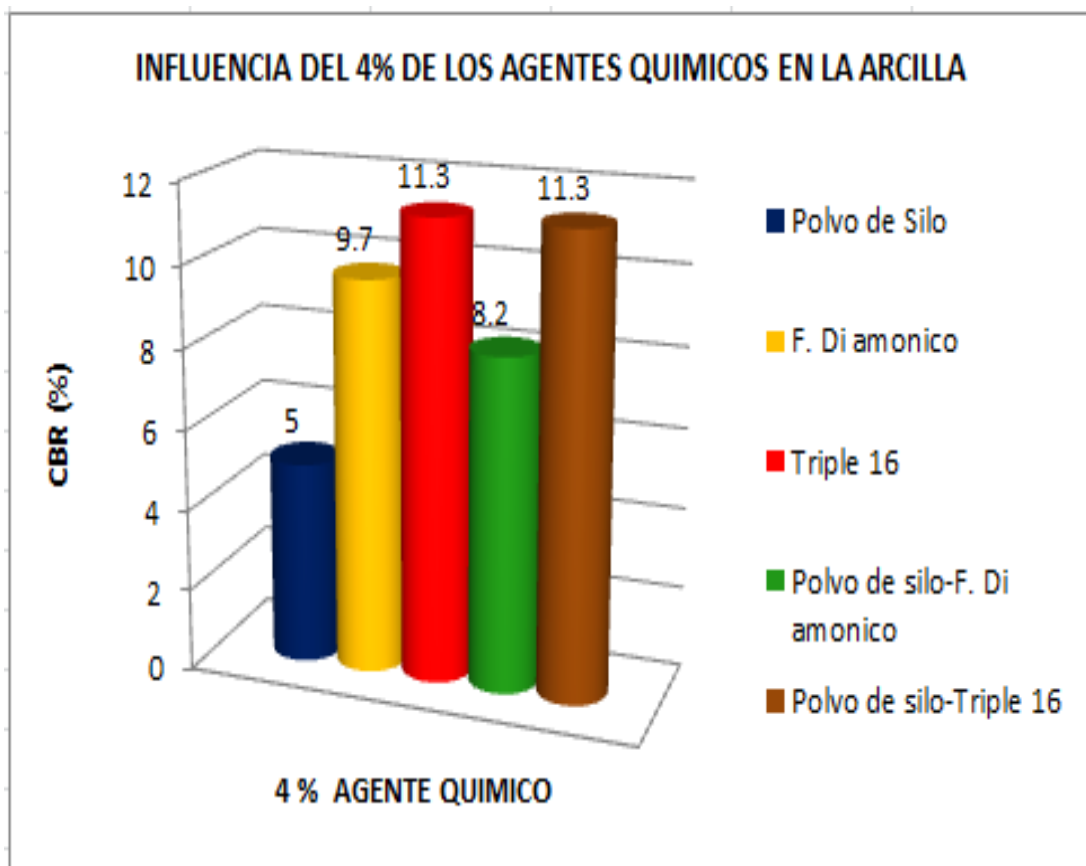
Como se puede observar en la **Figura N° 4.33** hubo un mayor aumento de CBR para la combinación de TRIPLE 16, incrementándose un 23.2 % con relación al de CBR de la limo, luego le sigue el POLVO DE SILO-TRILE 16 con un incremento de igual de 16.2%, después sigue el FOSFATO DI AMÓNICO con un incremento de 15.5% , luego POLVO DE SILO-FOSFATO DI AMÓNICO con incremento de 15.1% y por último el POLVO DE SILO con 8.5% de incremento con relación al CBR del limo sin estabilizar.



**Figura N° 4.33** Gráfica del comportamiento de los agente químicos al 6 % en los CBR entre el Agente químico-Suelo limoso

### 4.8.3 AGENTES QUÍMICOS-ARCILLA AL (4%)

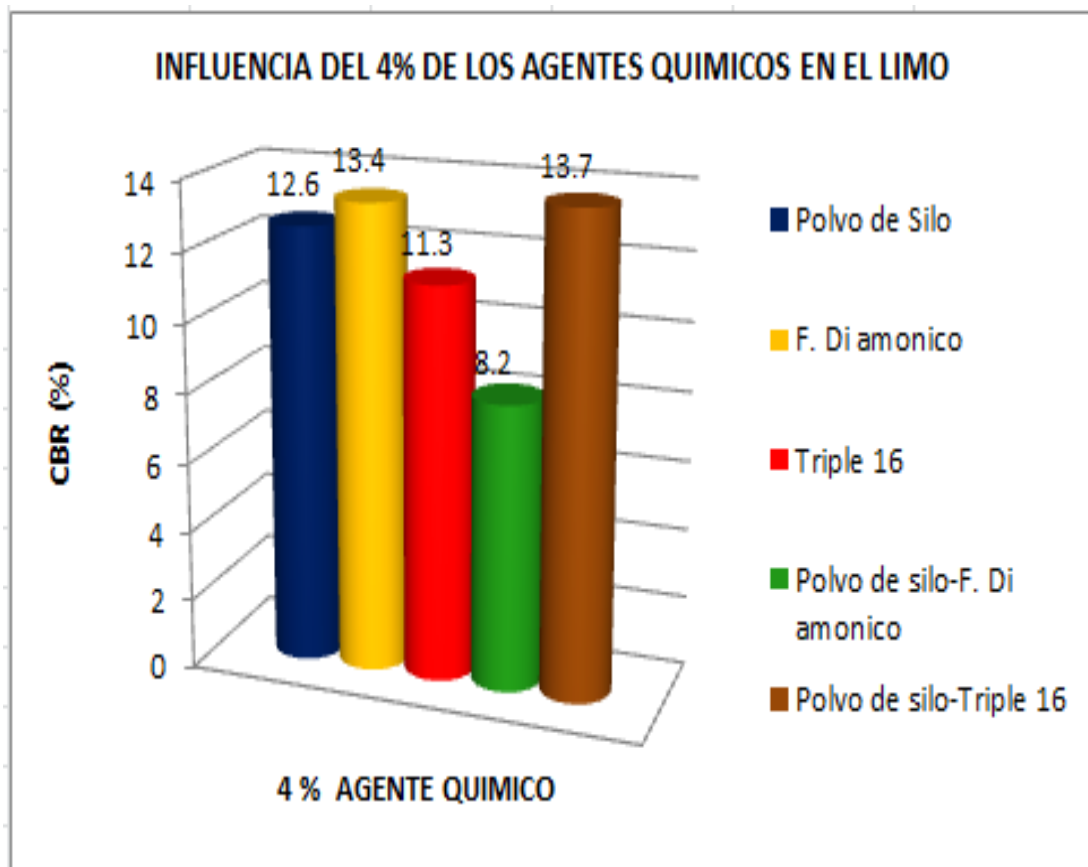
Como se puede observar en la **Figura N° 4.34** hubo un mayor aumento de CBR para la combinación TRIPLE 16 y el POLVO DE SILO-TRILE 16, incrementándose un 6.4% con relación al de CBR de la arcilla, luego le siguen FOSFATO DI AMÓNICO con un incremento de igual proporción de 4.8%, después sigue el POLVO DE SILO-FOSFATO DI AMÓNICO con un incremento de 3.3% y por último el POLVO DE SILO con 0.1% con relación al CBR de la arcilla pura.



**Figura N° 4.34** Gráfica del comportamiento de los agentes químicos al 4 % en los CBR entre el Agente químico-Suelo arcilloso

#### 4.8.4 AGENTES QUÍMICOS-LIMO AL (4%)

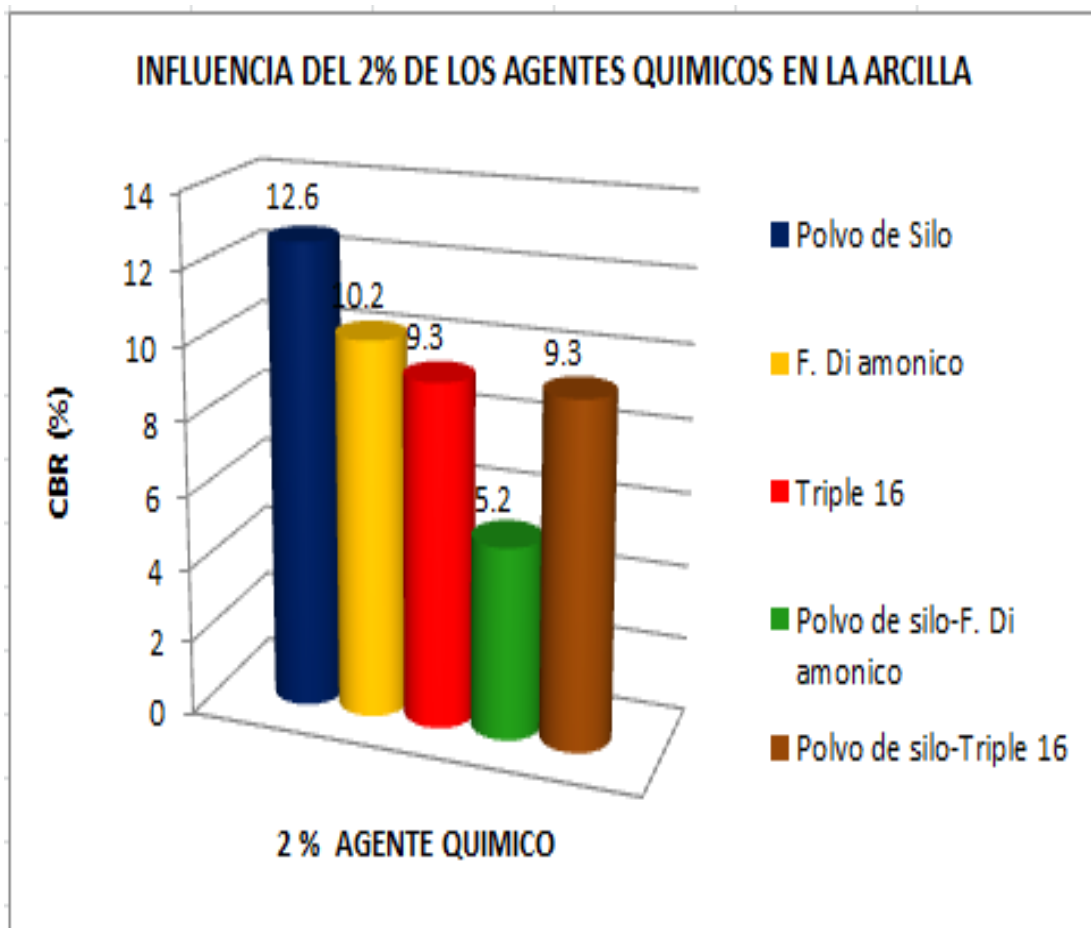
Como se puede observar en la **Figura N° 4.35** hubo un mayor aumento de CBR para la combinación de TRIPLE 16 , incrementándose un 19 % con relación al de CBR de la limo, luego le sigue el POLVO DE SILO-TRILE 16 con un incremento de igual de 9%, después sigue el FOSFATO DI AMÓNICO con un incremento de 8.7% , luego POLVO DE SILO con incremento de 7.9% y por último el POLVO DE SILO-FOSFATO DI AMÓNICO con 7.6% de incremento con relación al CBR del limo sin estabilizar.



**Figura N° 4.35** Gráfica del comportamiento de los agentes químicos al 4 % en los CBR entre el Agente químico-Suelo limoso

#### 4.8.5 AGENTES QUIMÍCOS-ARCILLA AL (2%)

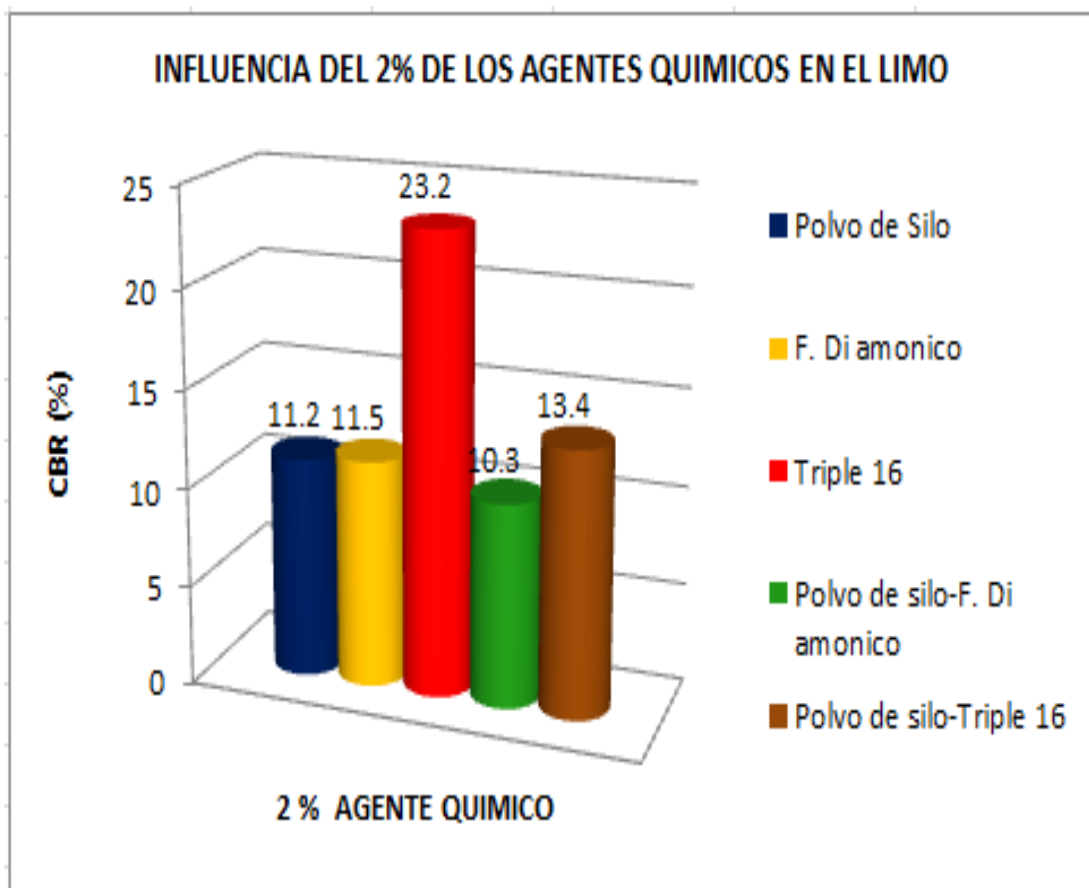
Como se puede observar en la **Figura N° 4.36** hubo un mayor aumento de CBR para la combinación FOSFATO DI AMÓNICO, incrementándose un 5.3% con relación al de CBR de la arcilla, luego le siguen TRIPLE 16 y el POLVO DE SILO-TRILE 16 con un incremento de igual proporción de 4.4%, después sigue el POLVO DE SILO con un incremento de 1.2% y por último el POLVO DE SILO-FOSFATO DI AMÓNICO con 0.3% con relación al CBR de la arcilla pura.



**Figura N° 4.36** Gráfica del comportamiento de los agentes químicos al 2 % en los CBR entre el Agente químico-Suelo arcilloso

#### 4.8.6 AGENTES QUIMICOS-LIMO AL (2%)

Como se puede observar en la **Figura N° 4.37** hubo un mayor aumento de CBR para la combinación de TRIPLE 16, incrementándose un 18.5 % con relación al de CBR de la limo, luego le sigue el POLVO DE SILO-TRILE 16 con un incremento de igual de 8.7%, después sigue el FOSFATO DI AMÓNICO con un incremento de 6.8% , luego POLVO DE SILO con incremento de 6.5% y por último el POLVO DE SILO-FOSFATO DI AMÓNICO con 5.6% de incremento con relación al CBR del limo sin estabilizar.



**Figura N° 4.37** Gráfica del comportamiento de los agentes químicos al 2 % en los CBR entre el Agente químico-Suelo limoso

#### 4.9 INFLUENCIA DEL COSTO PARA OBTENER UN CBR DE 6% CON LOS DIFERENTES AGENTES QUÍMICOS.

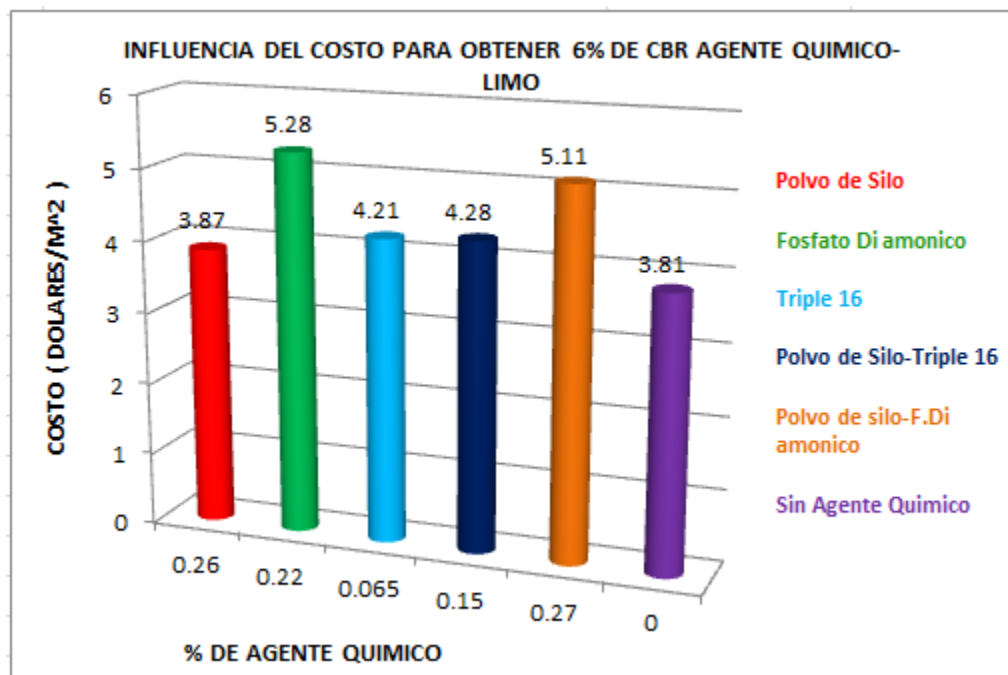
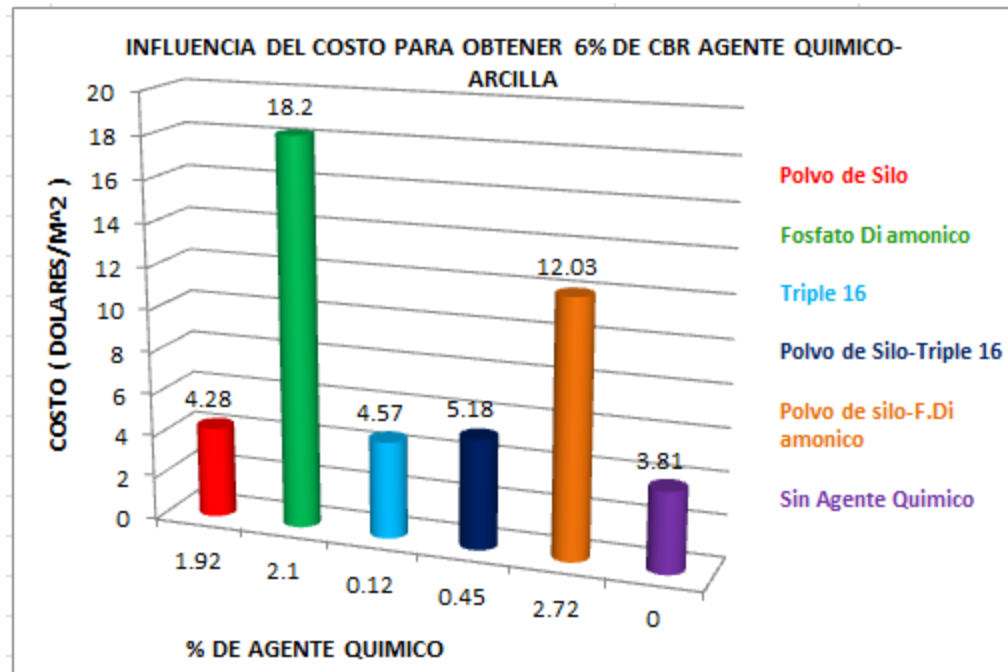
Para conocer la influencia del costo que tienen los diferentes Agentes químicos, se hace la comparación del costo que tienen los agentes químicos para obtener un CBR de 6%, el porcentaje de Agente químico varía de acuerdo a la curva que nos describe los resultados de CBR obtenidos con 6%, 4% y 2% de Agente químico.

A continuación se presentan los resultados para la Arcilla-Agente químico, las tablas de precios unitarios se las puede encontrar en Anexos 4.1.

<b>AGENTE QUIMICO-ARCILLA</b>	<b>%</b>	<b>Costo (Dolares/m2)</b>
Polvo de Silo	1.92	4.28
Fosfato Di amonico	2.1	18.2
Triple 16	0.12	4.57
Polvo de silo-Triple 16	0.45	5.18
Polvo de SiloFosfato Di amonico	2.72	12.03

Para los Limos-Agente Químico se tienen los siguientes resultados, las tablas de Precios unitarios se las puede encontrar en Anexos 4.2.

<b>AGENTE QUIMICO-LIMO</b>	<b>%</b>	<b>Costo (Dolares/m2)</b>
Polvo de Silo	0.26	3.87
Fosfato Di amonico	0.22	5.28
Triple 16	0.065	4.21
Polvo de silo-Triple 16	0.15	4.28
Polvo de SiloFosfato Di amonico	0.27	5.11



## 4.10 RESUMEN DE RESULTADOS

### 4.10.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA ESTABILIZAR

Los materiales utilizados para la estabilización poseen las siguientes características:

Muestra 1:

MUESTRA	%	%	%	%	%	%	Dmax	%	CLASIFICACION	
	Arcilla	Limo	Arena Fina	LL	LP	IP	gr/cm <sup>3</sup>	CHO	SUCS	AASHTO
LIMOSA	23	69	8	24	17	7	1.6	19	ML	A-4

Tabla 4.11 Características del material limoso obtenidas en laboratorio

Muestra 2:

MUESTRA	%	%	%	%	%	%	Dmax	%	CLASIFICACION	
	Arcilla	Limo	Arena Fina	LL	LP	IP	gr/cm <sup>3</sup>	CHO	SUCS	AASHTO
ARCILLOSA	60.2	34.1	5.7	49	33	17	1.88	17.17	CL	A-6(10)

Tabla 4.12 Características del material arcilloso obtenidas en laboratorio

### 4.10.2 SUELO – POLVO DE SILO

#### 4.10.2.1 POLVO DE SILO – ARCILLA

POLVO DE SILO	Dmax	%	%	%
%	gr/cm <sup>3</sup>	CHO	CBR	EXPANSION
0	1.88	17.17	4.9	3
2	1.975	12.12	4.8	2.6
4	1.966	13.13	4.4	2.8
6	1.953	12	6.1	3

Tabla 4.13 Características de la estabilización arcilla – polvo de silo

#### 4.10.2.2 POLVO DE SILO - LIMO

<b>POLVO DE SILO</b>	<b>Dmax</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>%</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>CHO</b>	<b>CBR</b>	<b>EXPANSION</b>
0	1.829	17.21	4.7	1.8
2	1.6	19.09	13.2	1.3
4	1.62	19.07	12.6	1.5
6	1.63	18.31	11.2	1.8

Tabla 4.14 Características de la estabilización polvo de silo - limo

#### 4.10.3 SUELO – FOSFATO DI AMÓNICO

##### 4.10.3.1 FOSFATO DI AMONICO – ARCILLA

<b>F. DI AMONICO</b>	<b>Dmax</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>%</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>CHO</b>	<b>CBR</b>	<b>EXPANSION</b>
0	1.88	17.17	4.9	3
2	1.91	12.45	8.5	4.3
4	1.95	11.1	11.6	4.7
6	1.98	8.67	5.7	4.8

Tabla 4.15 Características de la estabilización fosfato di amónico - arcilla

##### 4.10.3.2 FOSFATO DI AMONICO – LIMO

<b>F. DI AMONICO</b>	<b>Dmax</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>%</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>CHO</b>	<b>CBR</b>	<b>EXPANSION</b>
0	1.829	17.21	4.7	1.8
2	1.61	18.99	20.2	1.4
4	1.62	18.14	11.5	1.8
6	1.63	17.91	11.5	2

Tabla 4.16 Características de la estabilización fosfato di amónico - limo

#### 4.10.4 SUELO – TRIPLE 16

##### 4.10.4.1 TRIPLE 16 – ARCILLA

TRIPLE 16 %	Dmax gr/cm <sup>3</sup>	% CHO	% CBR	% EXPANSION
0	1.88	17.17	4.9	3
2	1.96	10.77	11.1	1.3
4	1.94	10.81	9.9	1.4
6	1.95	11.5	13.2	2

Tabla 4.17 Características de la estabilización triple 16 - arcilla

##### 4.10.4.2 TRIPLE 16 – LIMO

TRIPLE 16 %	Dmax gr/cm <sup>3</sup>	% CHO	% CBR	% EXPANSION
0	1.829	17.21	4.7	1.8
2	1.61	19.13	27.9	1.2
4	1.62	18.94	23.7	1
6	1.64	19.13	24.6	0.9

Tabla 4.18 Características de la estabilización triple 16 - limo

#### 4.10.5 SUELO – POLVO DE SILO-FOSFATO DI AMÓNICO

##### 4.10.5.1 POLVO DE SILO-FOSFATO DI AMONICO – ARCILLA

P.DE SILO-F.DI AMONICO %	Dmax gr/cm <sup>3</sup>	% CHO	% CBR	% EXPANSION
0	1.88	17.17	4.9	3
2	1.94	10.96	13.7	5.1
4	1.95	10.83	8.2	5.4
6	1.63	12.46	4.7	5.5

Tabla 4.19 Características de la estabilización fosfato di amónico-polvo de silo - arcilla

#### 4.10.5.2 POLVO DE SILO-FOSFATO DI AMÓNICO – LIMO

P.DE SILO-F.DI AMONICO	Dmax	%	%	%
%	gr/cm <sup>3</sup>	CHO	CBR	EXPANSION
0	1.829	17.21	4.7	1.8
2	1.59	19.63	19.8	1.3
4	1.61	18.55	12.3	1.6
6	1.63	19.55	10.3	2.1

Tabla 4.20 Características de la estabilización fosfato di amónico-polvo de silo – limo

#### 4.10.6 SUELO - POLVO DE SILO-TRIPLE 16

##### 4.10.6.1 POLVO DE SILO-TRIPLE 16 – ARCILLA

P.DE SILO-TRIPLE 16	Dmax	%	%	%
%	gr/cm <sup>3</sup>	CHO	CBR	EXPANSION
0	1.88	17.17	4.9	3
2	1.98	10.4	13.5	2.5
4	1.96	11.95	11.3	3
6	1.95	10.84	9.3	3.4

Tabla 4.21 Características de la estabilización triple 16-polvo de silo - arcilla

##### 4.10.6.2 POLVO DE SILO-TRIPLE 16 - LIMO

P.DE SILO-TRIPLE 16	Dmax	%	%	%
%	gr/cm <sup>3</sup>	CHO	CBR	EXPANSION
0	1.829	17.21	4.7	1.8
2	1.63	19.55	20.9	1.9
4	1.61	19.7	13.7	2.2
6	1.59	19.72	13.4	2.4

Tabla 4.22 Características de la estabilización triple 16-polvo de silo - limo

#### 4.11 ANALISIS ESTADÍSTICO (PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO CBR)

El análisis estadístico se lo realizo con todos los resultados obtenidos de los CBR al 95 % de todas las combinaciones echas en la investigación de la estabilización de suelos tanto arcillosos como limosos.

Obteniéndose los siguientes resultados que se presentan en la **Tabla 4.23** donde se puede observar que el valor medio de la tabla de nuestros resultados es 11.5 y pertenece la combinación limo – fosfato di amónico al 2 %, la moda los valores más frecuentes en el conjunto de datos pertenecen a las combinaciones de arcilla-triple 16 2% y del limo-polvo de silo 6%. El valor máximo encontrado en nuestros resultados pertenece al de la combinación, limo-triple16 6% y el valor más bajo encontrado en en nuestros resultados pertenece al de la arcilla-polvo de silo 4%.

MEDIA	MEDIANA	MODA	DESVIACION	VARIANZA	MAXIMOS	MINIMOS
ARITMETICA			MEDIA			
12.71	11.55	13.2	5.88	33.39	27.9	4.4

**Tabla 4.23 Características estadísticas de los resultados de los CBR al 95 %**

## 4.12 REPORTE FOTOGRAFICO.

### 4.12.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

#### Molido de la muestra



#### Tamizado

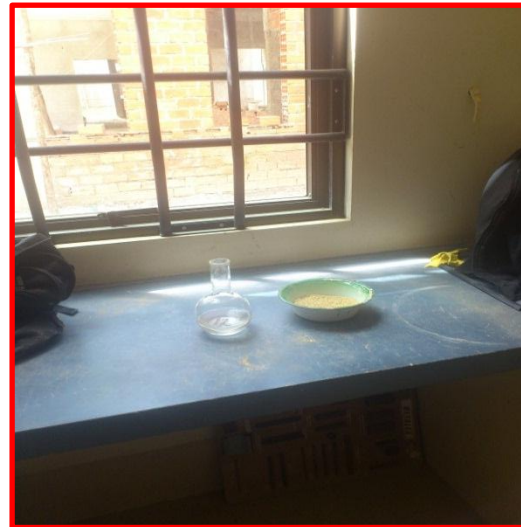


#### Lavado de la muestra tamiz 200



#### 4.12.2 HIDRÓMETRO

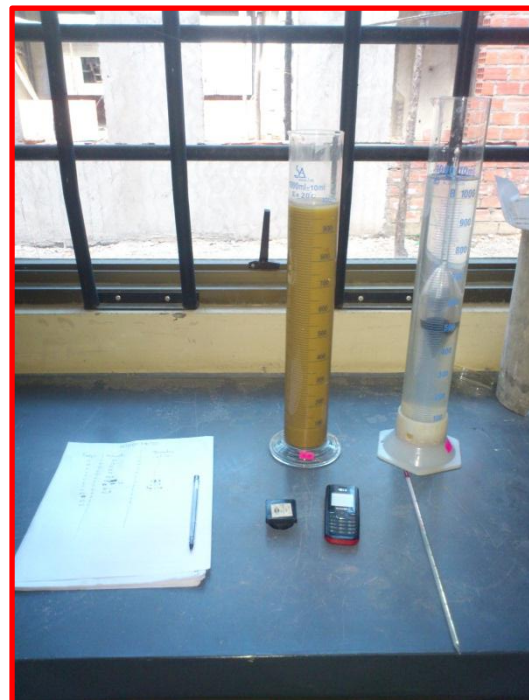
Mezclado el material con el químico



Agitado de la muestra



Cronometraje y lectura del hidrómetro



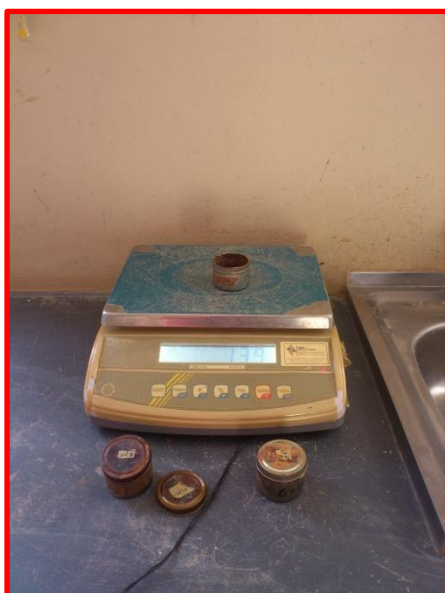
### 4.12.3 LÍMITES DE ATTERBERG



Haciendo rollitos



Pesado de los rollitos



#### 4.12.4 PROCTOR

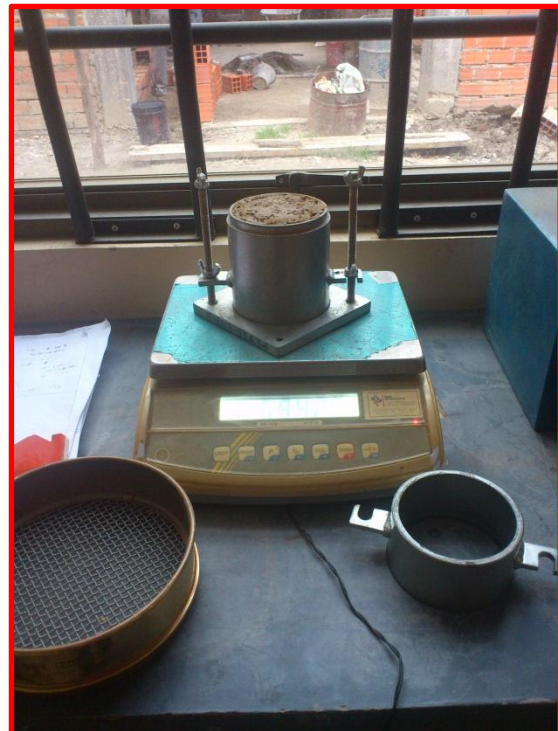
##### Tamizado y preparado de la muestra



##### Compactado la muestra



##### Pesado de las Muestra compactada



#### 4.12.5 PRUEBA DE RELACIÓN DE SOPORTE CBR

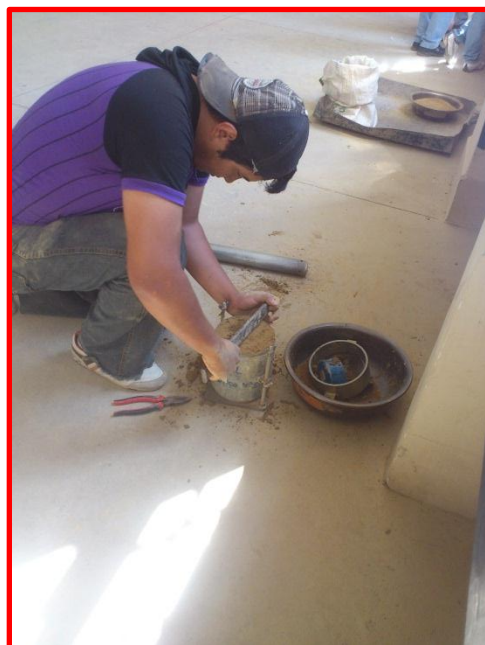
##### Mezclado del material con agua



##### Compactado



##### Enrasado



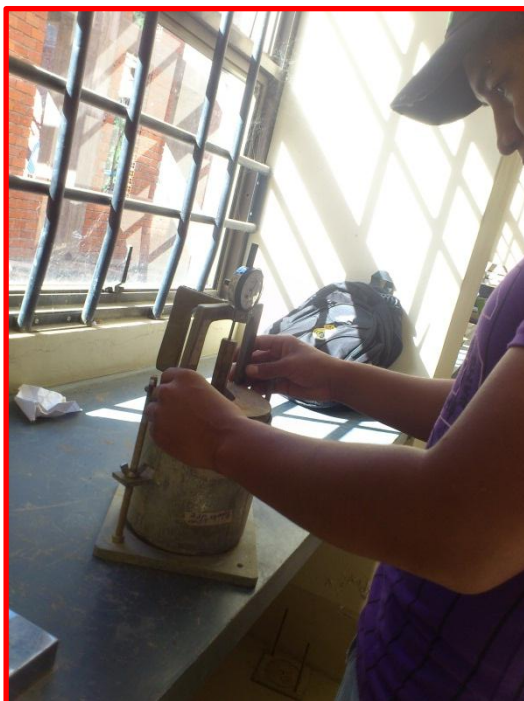
**Molde sometido al CBR**



**Moldes con pesas**



**Lectura de la extensión**



## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1.	CONCLUSIONES.....	89
5.2.	RECOMENDACIONES.....	96

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Las densidades máximas obtenidas de las mezclas para diferentes porcentajes de agente químico-suelo, muestran un pequeño incremento de densidad respecto al suelo arcilloso sin estabilizar de  $0.1 \text{ gr/cm}^3$  para el valor más alto obtenido de densidad máxima para la mezcla F.Di amónico-Arcilla al 6 (%).

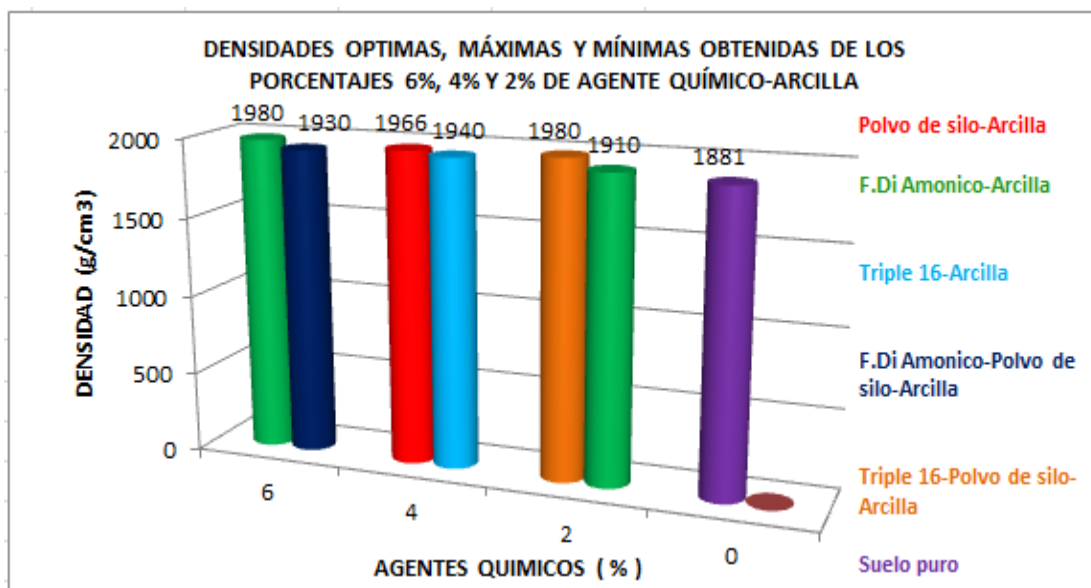


Figura N° 1 Densidades óptimas, máximas y mínimas obtenidas de los porcentajes 6%, 4% y 2% de Agente químico-Arcilla

AGENTES QUIMICOS ARCILLA	COMBINACION	MAXIMAS	DISPERSION	COMBINACION	MINIMAS	DISPERSION
		Dmax (gr/cm <sup>3</sup> )			Dmax (gr/cm <sup>3</sup> )	
0	ARCILLA	1.881	0	ARCILLA	1.881	0
2	POLVO DE SILO-TRIPLE 16	1.98	0.10	F.DI AMONICO	1.91	0.03
4	POLVO DE SILO	1.966	0.09	TRIPLE 16	1.94	0.06
6	F.DI AMONICO	1.98	0.10	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	1.93	0.05

Tabla 1 Análisis de dispersión de densidades óptimas máximos y mininos obtenidas de los porcentajes de Agente químico-Arcilla 6%, 4% y 2%, con relación al suelo puro.

- De lo observado de todos los resultados obtenidos de densidades, de las mezclas concluimos que el valor más alto de densidad para las arcillas estabilizadas fue  $1.98 \text{ g/cm}^3$  con el agente químico, Polvo de silo-Triple 16 (2%) y para el F.Di

amónico (6%), y el valor mínimo fue 1.91 g/cm<sup>3</sup> con el agente químico, F.Di amónico (2%)

- En el caso de los limos si se puede apreciar una disminución considerable de las densidades obtenidas de las mezclas, con relación al suelo limoso sin estabilizar, siendo la disminución más significativa de -0.25 gr/cm<sup>3</sup> para la combinación de Polvo de silo-triple 16-Limo al 6 (%).

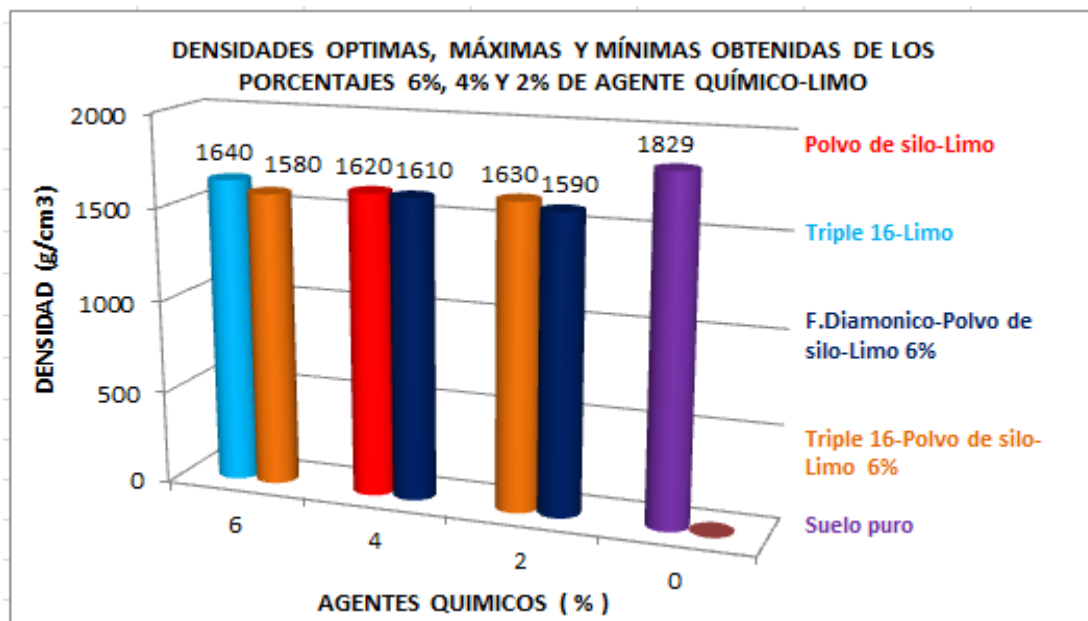


Figura N° 2 Densidades óptimas, máximas y mínimas obtenidas de los porcentajes 6%, 4% y 2% de Agente químico-Limo

AGENTES QUIMICOS	COMBINACION	MAXIMAS	DISPERSION	COMBINACION	MINIMAS	DISPERSION
		Dmax (gr/cm <sup>3</sup> )			Dmax (gr/cm <sup>3</sup> )	
0	LIMO	1.829	0	LIMO	1.829	0
2	POLVO DE SILO-TRIPLE 16	1.63	-0.20	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	1.59	-0.24
4	POLVO DE SILO	1.62	-0.21	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	1.61	-0.22
6	TRIPLE 16	1.64	-0.19	POLVO DE SILO-TRIPLE 16	1.58	-0.25

Tabla 2 Análisis de dispersión de densidades óptimas máximos y mínimos obtenidos de porcentajes de Agente químico-Arcilla 6%, 4% y 2%, con relación al suelo puro.

- De los resultados finales de densidades máximas encontradas en las mezclas practicadas, decimos que el valor más alto de densidad para los limos estabilizados fue 1.64 g/cm<sup>3</sup> con el agente químico, Triple 16 (6%), y el valor mínimo fue 1.58 g/cm<sup>3</sup> con el agente químico, Polvo de silo-Triple 16 (6%).

- De los resultados obtenidos de las mezclas de CBR se pudo apreciar, al comparar los resultados con el suelo puro arcilloso, que hubo un mejoramiento considerable del CBR llegando a un valor de incremento favorable de 8.8%, notando también que hubo una mezcla que no dio buenos resultados produciendo una pequeña rebaja del CBR de 0.1 % para la combinación Polvo de silo-Arcilla.

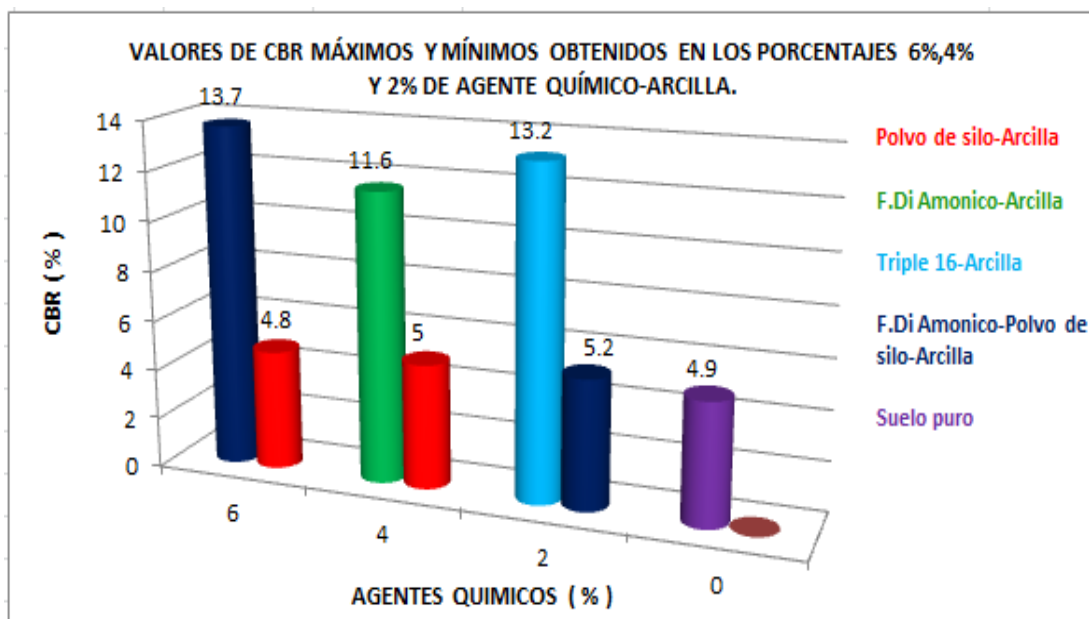


Figura N° 3 Valores de CBR máximos y mínimos obtenidos en los porcentajes 6%,4% y 2% de Agente químico-Arcilla.

AGENTES QUIMICOS ARCILLA	COMBINACION	MAXIMOS CBR (%)	DISPERSION	COMBINACION	MINIMOS CBR (%)	DISPERSION
0	ARCILLA	4.9	0	ARCILLA	4.9	0
2	TRIPLE 16	13.2	8.30	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	5.2	0.30
4	F.DI AMONICO	11.6	6.70	POLVO DE SILO	5	0.10
6	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	13.7	8.80	POLVO DE SILO	4.8	-0.10

Tabla 3 Análisis de dispersión de CBR, máximos y mininos obtenidos de los porcentajes 6%,4% y 2% de Agente químico-Arcilla, con relación al suelo puro.

- En conclusión a lo referido a los CBR entre el Agente químico-Arcilla se obtuvo el valor más alto de CBR, para las arcillas estabilizadas de 13.7 % con el agente químico, Polvo de silo-F.Di amónico (6%), y el valor mínimo fue 4.8 % con el agente químico, Polvo de silo (6%)

- Se obtuvo los mejores resultados de CBR de la investigación con las mezclas Agente químico-Limo obteniéndose el mayor incremento de CBR de la mezcla con relación al suelo puro de 23,20 % para la combinación Limo-Triple 16 (6%), observándose esta misma tendencia de incremento para los demás porcentajes practicados de 4 (%) y 2 (%).

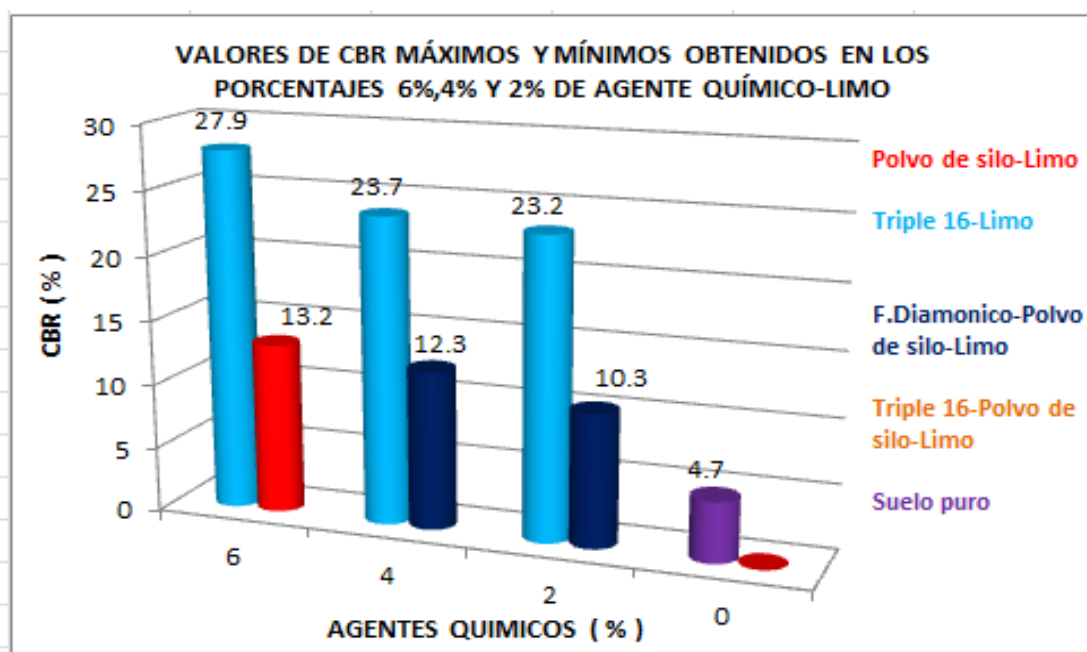


Figura N° 4 Valores de CBR máximos y mínimos obtenidos en los porcentajes 6%,4% y 2% de Agente químico-Limo.

AGENTES QUIMICOS LIMO	COMBINACION	MAXIMAS	DISPERSION	COMBINACION	MINIMAS	DISPERSION
		CBR (%)			CBR (%)	
0	LIMO	4.7	0	LIMO	4.7	0
2	TRIPLE 16	23.2	18.50	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	10.3	5.60
4	TRIPLE 16	23.7	19.00	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	12.3	7.60
6	TRIPLE 16	27.9	23.20	POLVO DE SILO	13.2	8.50

Tabla 4 Análisis de dispersión de CBR, máximos y mininos obtenidos de los porcentajes 6%,4% y 2% de Agente químico-Limo, con relación al suelo puro.

- De los CBR, se concluye habiendo hecho el análisis de resultados de los porcentajes de CBR encontrados de las mezclas, que el valor más alto de CBR, para los limos estabilizados fue 27.9 % con el agente químico, Triple 16 (6%), y el valor mínimo fue 10.3 % con el agente químico, Polvo de silo-F.Di amónico (2%)

- La expansión en las mezclas Agente químico-Arcilla, tuvo un comportamiento muy disparate ya que se obtuvo un incremento considerable de expansión con relación al suelo no estabilizado de 2.6 % para la combinación F.Di amónico-Polvo de silo al (2%) y un decrecimiento de expansión considerable también de 1.7 % con relación al suelo puro, para la combinación Triple 16 al (2%).

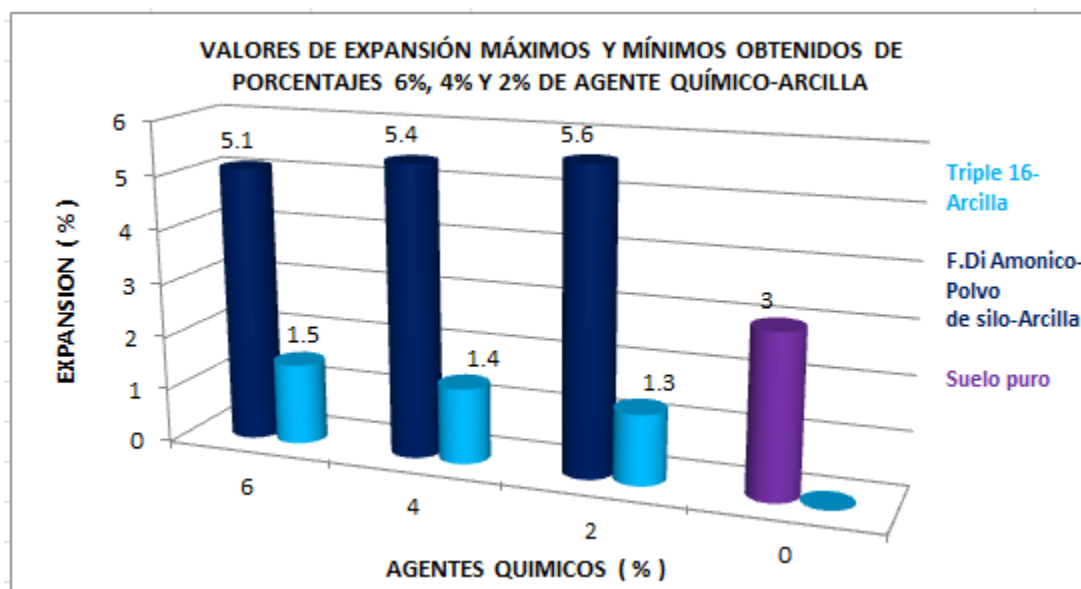


Figura N° 5 Valores de expansión máximos y mínimos obtenidos de porcentajes 6%, 4% y 2% de Agente químico-Arcilla

AGENTES QUÍMICOS ARCILLA	COMBINACION	MAXIMOS	DISPERSION	COMBINACION	MINIMOS	DISPERSION
		EXPANSION (%)			EXPANSION (%)	
0	ARCILLA	3	0	ARCILLA	3	0
2	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	5.6	2.60	TRIPLE 16	1.3	-1.70
4	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	5.4	2.40	TRIPLE 16	1.4	-1.60
6	POLVO DE SILO-F.DI AMONICO	5.1	2.10	TRIPLE 16	1.5	-1.50

Tabla 5 Análisis de dispersión con las expansiones máximas y mínimas obtenidas de los porcentajes de 6%,4% y 2% de Agente químico-Arcilla con relación al suelo puro.

- Los valores más altos de expansión obtenidos para las arcillas estabilizadas fue 5.6 % con el agente químico, Polvo de silo-F.Di amónico (2%), y el valor mínimo fue 1.3 % con el agente químico, Triple 16 (2%).
- El comportamiento de los limos ante la expansión fue mas o menos similar al de las arcillas porque se tuvo un incremento de 0.6 % con la combinación Polvo de

siló-Triple 16 (2%) y un decrecimiento a la vez también de -0.9 % estos con relación al suelo puro, para la combinación Triple 16 al (2%).

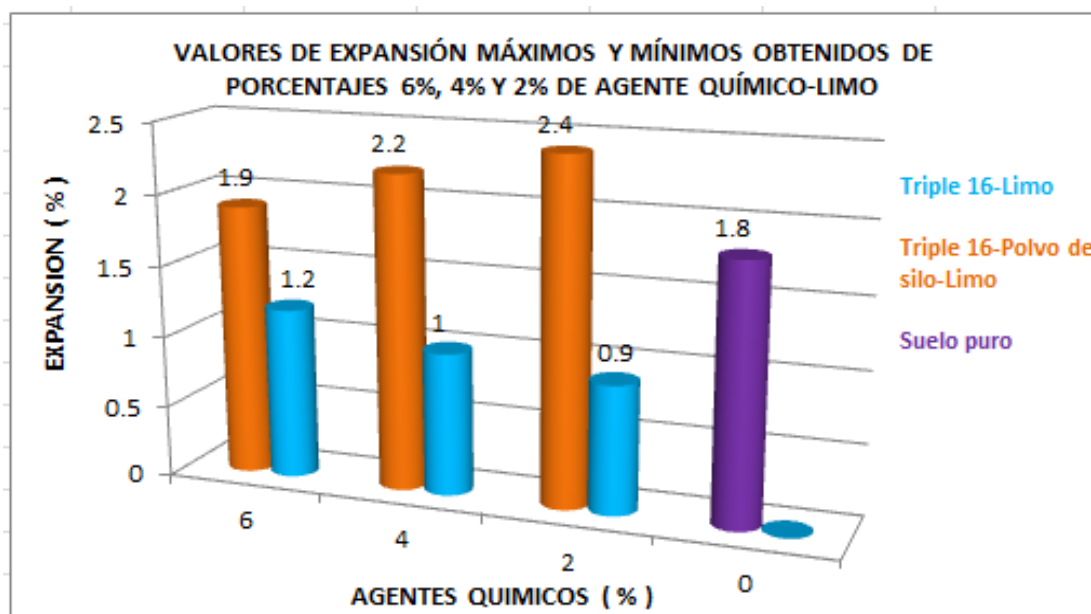


Figura N° 6 Valores de expansión máximos y mínimos obtenidos de porcentajes 6%, 4% y 2% de Agente químico-Limo.

AGENTES QUIMICOS	COMBINACION	MAXIMAS	DISPERSION	COMBINACION	MINIMAS	DISPERSION
		EXPANSION (%)			EXPANSION (%)	
LIMO	LIMO	1.8	0	LIMO	1.8	0
2	POLVO DE SILO-TRIPLE 16	2.4	0.60	TRIPLE 16	0.9	-0.90
4	POLVO DE SILO-TRIPLE 16	2.2	0.40	TRIPLE 16	1	-0.80
6	POLVO DE SILO-TRIPLE 16	1.9	0.10	TRIPLE 16	1.2	-0.60

Tabla 6 Análisis de dispersión con las expansiones máximas y mininos obtenidas de los porcentajes de 6%,4% y 2% de Agente químico-Limo con relación al suelo puro.

- El valor más alto de expansión obtenido para los limos estabilizados fue 2.4 % con el agente químico, Polvo de silo-Triple 16 (4%), y el valor mínimo fue 0.9 % con el agente químico, Triple 16 (2%)
- Al hacer el análisis de costos con relación al 6% de porcentaje CBR para los distintos agentes químicos en el capítulo cuatro, entre las mezclas de Agente Químico-Arcilla observamos un menor costo similar, para los agentes químicos

Polvo de silo con un precio de 4.28 (dólares/m<sup>2</sup>) y Triple 16 con 4.57 (dólares/m<sup>2</sup>) de subrasante estabilizada y para el caso de los Limos-Agente Químico un menor costo para el Agente Químico Polvo de silo con un costo de 3.87 (dólares/m<sup>2</sup>) de subrasante estabilizada.

Lo que nos muestra la factibilidad técnica como económica de resultados más económicos utilizando el Agente Químico POLVO DE SILO para estabilizar el tipo de suelo de subrasante estudiada.

- El Ion calcio y Sílice contenido en el POLVO DE SILO nos proporcionó mejores resultados tanto desde el punto de vista técnico como económico, el Ion Fosfato contenido en el caso del fertilizante TRIPLE 16, nos dio los mejores resultados desde el punto de vista técnico de mejora del porcentaje de CBR pero no así económicamente ya que el costo de este fertilizante es un poco elevado, y por último haciendo mención al tercer agente químico utilizado el FOSFATO DI AMÓNICO no se apreció resultados importantes, tanto hablando de lo que se refiere a la economía, ni a la parte técnica de aumento del porcentaje de CBR.

AGENTE QUIMICO-ARCILLA	ION	%	Costo (Dolares/m <sup>2</sup> )
Polvo de Silo	Calcio y Silice	1.92	4.28
Fosfato Di amonico	Fosfato	2.1	18.2
Triple 16	Fosfato	0.12	4.57
Polvo de silo-Triple 16	Calcio, Silice y Fosfato	0.45	5.18
Polvo de SiloFosfato Di amonico	Calcio, Silice y Fosfato	2.72	12.03

AGENTE QUIMICO-LIMO	ION	%	Costo (Dolares/m <sup>2</sup> )
Polvo de Silo	Calcio y Silice	0.26	3.87
Fosfato Di amonico	Fosfato	0.22	5.28
Triple 16	Fosfato	0.065	4.21
Polvo de silo-Triple 16	Calcio, Silice y Fosfato	0.15	4.28
Polvo de SiloFosfato Di amonico	Calcio, Silice y Fosfato	0.27	5.11

## 5.2. RECOMENDACIONES.

- Visto que se tuvo buenos resultados utilizando fertilizantes como agente químico, se podrían plantear nuevas investigaciones con otras variedades más económicas de fertilizantes, que no fueron objeto de nuestro estudio en nuestro trabajo, ya que existe una gran diversidad de fertilizantes con similar composición química pero en porcentajes diferentes, lo que al ser aplicados en suelo para su estabilización nos podrían proporcionar mejores resultados que los vistos en esta investigación.
- En investigaciones futuras se deberían implementar ensayos con el material saturado, a fin de evaluar el comportamiento del paquete estructural bajo una condición extrema de inundación o períodos de lluvia, ya que en los resultados obtenidos se observó que las características de las mezclas realizadas, en cuanto porcentaje de CBR y DENSIDADES MÁXIMAS cambian repentinamente bajo la acción del agua.
- No dejarse llevar por vendedores que ofrecen productos similares en el caso de los fertilizantes ya que hay una gran variedad, pero con composición química distinta a los estudiados en esta investigación que podrían no ser favorables, aplicados en la estabilización de subrasantes.
- Se recomienda estudiar la utilización de otros tipos de fertilizantes producidos en nuestra región, y que puedan conformar nuevas alternativas para la estabilización de carreteras no pavimentadas.