

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Los suelos, en muchas ocasiones no presentan las mejores características para ser usados en los diferentes proyectos de ingeniería, ya que presentan una resistencia deficiente, sufren deformaciones, desgastes y al largo plazo se deterioran de manera negativa. Muchas veces es necesario realizar grandes movimientos de tierra para reemplazar el suelo destinado para la obra, lo que genera una mayor inversión para el propietario o para el estado.

La estabilización de suelos, se considera una herramienta fundamental hacia el apropiado desarrollo de estructuras horizontales como lo son los pavimentos tanto rígidos como flexibles. Esto, debido a que proporcionan mejores condiciones del suelo, aumentando la vida útil de las carreteras, disminuyendo el tiempo para el mantenimiento de estas. Este proceso puede ser aplicado a todo tipo de carreteras mejorando la subrasante dentro de un paquete estructural de mediano o alto tráfico, disminuyen su influencia gracias a la estabilización del suelo, optimizando los costos del desarrollo en la obra, y obteniendo un impacto ambiental menor.

Por esta razón el tema de estabilización de suelos es muy importante en construcciones viales con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas del material mediante la incorporación de pequeñas cantidades relativas de compuestos de estabilizadores químicos.

La estabilización de suelos con aditivos es una técnica muy utilizada en Ingeniería Civil que sirve para mejorar las propiedades físicas y mecánicas, sus parámetros son la alta plasticidad, baja permeabilidad y capacidad de soporte del terreno, lo que los hacen inadecuados para su uso como materiales de construcción. La adición de materiales tales como cal, yeso, cemento y otros aditivos, se utiliza con frecuencia en los suelos críticos, estabilizándolos para mejorar su resistencia. (Sánchez, Castro, Ureña, & Azañon, 2014).

Una de las alternativas con las que se puede controlar las variaciones volumétricas de los suelos expansivos es mediante la adición de productos químicos que saturen su capacidad

de intercambio catiónico, entre estos procedimientos se encuentran el uso del hidróxido de calcio y cemento; el tratamiento del suelo se realiza mediante la dosificación en términos de porcentajes del producto estabilizante. (Sánchez Alban María, 2014)

En los terrenos arcillosos, particularmente en climas áridos o semiáridos, es altamente probable encontrar problemas relacionados con inestabilidades volumétricas ante la ganancia o pérdida de agua. Existen en la práctica diversos métodos para estabilizar tales suelos; cada método, utiliza diferentes agentes estabilizadores, entre los que se pueden encontrar: la cal, el cemento Portland, productos asfálticos, ácidos orgánicos, resinas y polímeros, sales entre otros. (Díaz & Mejía, 2004).

Una estabilización mixta logra que un estabilizador compense la carencia del otro. El cemento ayuda al incremento de la resistencia y durabilidad, el hidróxido de calcio tiene como propósito mejorar las características de trabajabilidad, reduciendo principalmente la plasticidad del suelo.

Esta investigación se centra en analizar el mejoramiento y estabilización de los suelos arcillosos de la comunidad de Cañon Oculto mediante el uso del hidróxido de calcio y cemento.

## **1.2 Situación problemática**

Uno de los mayores problemas a tratar en una construcción vial, hace referencia a la calidad del suelo, es por esto que se recurre a la estabilización de suelos.

La estabilización de un suelo mejora su estabilidad volumétrica, aumenta su resistencia, mejora su permeabilidad y durabilidad y reduce su susceptibilidad al agua.

Los pavimentos sobre subrasantes arcillosas son en algunos casos no recomendables debido a la inadecuada capacidad portante de este tipo de suelo para soportar las cargas de tránsito transmitidas por la estructura de un pavimento. Ante ello, la estabilización de suelos es una técnica muy utilizada con la finalidad de que mejoren las características de estos y así obtener parámetros adecuados para ser usados.

Uno de los problemas que presenta la comunidad Cañon Oculto reside en los suelos de baja resistencia presentes en la región. Estos suelos, caracterizados por su falta de resistencia, han dado lugar a una serie de dificultades en la carretera principal que atraviesa

la comunidad. La presencia de numerosas fallas y defectos en esta vía es atribuible en gran medida a la deficiente calidad de la subrasante sobre la cual se encuentra el pavimento. Además, en la comunidad existen bancos de suelos arcillosos que son conocidos por causar problemas en la ingeniería civil debido a sus propiedades físicas y mecánicas particulares.

### **1.2.1 Problema**

¿Cómo la estabilización con hidróxido de calcio y cemento mejorará las propiedades físico mecánicas del suelo arcilloso de la comunidad de Cañon Oculto?

### **1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema**

La importancia de la presente investigación se basa en mejorar las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos provenientes de la comunidad de Cañon Oculto, con el propósito de que estos suelos puedan ser tomados en cuenta para presentes y futuros proyectos de la ingeniería civil e ingeniería geotécnica.

Por último, concluimos que la presente investigación sí es factible, por el hecho de que el laboratorio de la universidad (UAJMS) proporciona materiales y equipos adecuados a un costo mínimo para llevar a cabo la investigación.

### **1.2.3 Delimitación temporal**

La investigación actual es válida hasta que cambien las condiciones del terreno del que se extrajo el material. En resumen, las propiedades físicas y mecánicas del suelo en análisis presentarán propiedades diferentes a los resultados encontrados en esta investigación.

### **1.2.4 Delimitación espacial**

Las muestras extraídas de suelos arcillosos para el desarrollo de la investigación son procedentes de la comunidad de Cañon Oculto, municipio de Yacuiba, departamento de Tarija.

## **1.3 Justificación de la investigación**

La investigación nos servirá para brindar mayor información sobre la estabilización de los suelos arcillosos mediante hidróxido de calcio y cemento, el estudio se sustenta en la importancia de abordar un problema geotécnico de relevancia y en la búsqueda de soluciones prácticas y efectivas para mejorar la calidad de los suelos.

La presente investigación contribuirá al conocimiento y aportará información para la ingeniería civil, permitiendo que las entidades públicas y privadas tenga un criterio base para poder ser usados en futuros proyectos, que se tome en consideración para la planificación de la construcción de las carreteras.

La justificación del presente trabajo surge por la necesidad de analizar e identificar materiales que brinden un mejor comportamiento en suelos arcillosos de la comunidad de Cañon Oculto para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, mediante una estabilización incorporando hidróxido de calcio y cemento, con la dosificación indicada. Se pretende llevar a cabo mediante el estudio del comportamiento mecánico de un suelo, a través de una estabilización química con hidróxido de calcio y cemento, realizando diversos ensayos de laboratorio, que puedan demostrar porcentajes óptimos de estos materiales para disminuir problemas provocados por las arcillas.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar los suelos arcillosos de la comunidad de Cañon Oculto, mediante la estabilización con hidróxido de calcio y cemento, con la finalidad de obtener un material con propiedades físico mecánicas adecuadas para su empleo como material de subrasante mejorada.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar las muestras de suelos arcillosos.
- Establecer la dosificación en porcentajes de suelo-hidróxido de calcio y suelo-cemento.
- Determinar el porcentaje óptimo de hidróxido de calcio más cemento para la estabilización mixta de suelos arcillosos.
- Analizar los resultados obtenidos.
- Realizar prueba de hipótesis con los resultados adquiridos.

## 1.5 Hipótesis

Sí, al realizar el análisis de suelos arcillosos de la comunidad de Cañon Oculito estabilizados con hidróxido de calcio y cemento, se podrán mejorar la resistencia cortante (CBR) y el índice de plasticidad.

## 1.6 Identificación de variables

### 1.6.1 Variable independiente

Porcentajes de hidróxido de calcio y cemento.

### 1.6.2 Variable dependiente

- Límites de Atterberg.
- Relación de soporte de California CBR.

### 1.6.3 Conceptualización y operacionalización de variables

**Tabla 1.1** Operacionalización de variable independiente

Variable independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Porcentajes de hidróxido de calcio y cemento	La adición de porcentajes de hidróxido de calcio y cemento,	Cantidad de hidróxido de calcio y cemento	Porcentaje (%)	Calculado respecto al peso total de la muestra
	logrará mejorar la resistencia cortante (CBR) y el índice de plasticidad	Mezcla de suelo - hidróxido de calcio - cemento	Gramos (g)	Mezcla del suelo arcilloso con hidróxido de calcio y cemento

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 1.2** Operacionalización de variable dependiente

Variable dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Límites de Atterberg	Los límites de Atterberg son un conjunto de propiedades que describen el comportamiento de un suelo en relación con su contenido de humedad	Índice de plasticidad	Porcentaje (%)	Calculado restando el límite líquido menos el límite plástico
Relación de soporte de California CBR	La prueba mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas	Contenido de humedad	Porcentaje (%)	Valor obtenido de la muestra tomada en el lugar de estudio
		Prueba de resistencia al corte para determinar el índice CBR	Porcentaje (%)	Colocar la muestra en la prensa CBR

**Fuente:** Elaboración propia

### 1.7 Procesamiento de la información

Se realizará los ensayos de laboratorio para suelo natural y para suelo con aditivo, después de realizar la parte práctica de la investigación se realiza a un estudio de gabinete, cuyos resultados se les realizará críticas y autocríticas.

## **1.8 Alcance de la investigación**

El alcance del presente proyecto de investigación es llegar a la investigación tipo causal o explicativa, debido a que se busca analizar las relaciones de causa y efecto entre variables, pues con este proyecto se pretende explicar el comportamiento de la resistencia al corte (CBR) e índice de plasticidad del suelo arcilloso cuando se aplica un proceso de estabilización química mediante hidróxido de calcio y cemento.

La investigación se estructura en cinco capítulos que servirán como marco para el desarrollo del proyecto.

En el primer capítulo del proyecto se realiza una introducción teórica, que abarca desde justificar el motivo por el cual se realizará una estabilización química de suelos mediante el uso de hidróxido de calcio y cemento, se identifica el problema y se propone su solución. Identificamos los objetivos del proyecto y fundamentamos el proyecto en una hipótesis confiable.

El segundo capítulo del proyecto es importante, pues se elabora un marco teórico relacionado con la estabilización de suelos. En esta fase se examinan los diversos métodos o tipos de estabilizaciones que hay, y se selecciona el método específico que se implementará en el presente proyecto, siendo una estabilización química. Se proporcionará información de los aditivos que se emplearán en la investigación y que propiedades del suelo se llegará a mejorar.

El capítulo III es considerado uno de los más importantes de todo el proyecto, ya que aquí es donde se desarrollará de manera práctica la estabilización de suelos. Se inicia realizando una recopilación de información de la zona de estudio, ya definiendo la zona del proyecto, se procederá a realizar el muestreo, que implica extraer muestras de material arcilloso. Posteriormente se realizarán los ensayos correspondientes del suelo arcilloso antes y después de la estabilización. Los resultados obtenidos se emplearán para realizar análisis que permitirán evaluar el impacto de la estabilización en el suelo de estudio.

El cuarto capítulo inicia con un análisis de resultados destinado a evaluar el efecto de la estabilización en el suelo de estudio. Posteriormente, se realiza un análisis estadístico basado en la hipótesis planteada en el primer capítulo del proyecto.



El quinto y último capítulo, se enfocará en la parte conclusiva del proyecto, donde, después de analizar los resultados obtenidos, se realizará las conclusiones correspondientes a este proyecto, finalizando con las recomendaciones generadas durante el proceso de realización del proyecto.

**CAPÍTULO II**

**ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA**

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS**

## CAPÍTULO II

### ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS

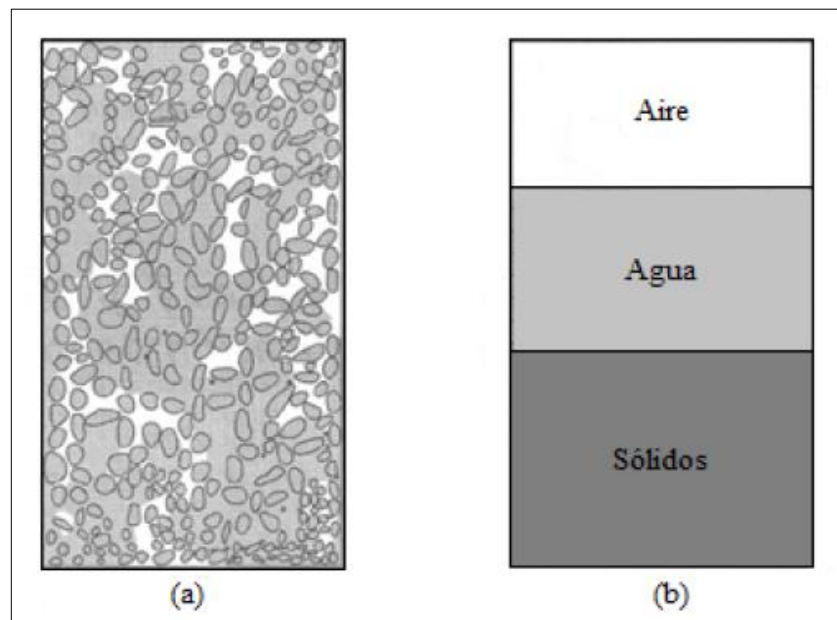
#### 2.1 Suelo

La geología nos aporta valiosos datos que nos ayuda como punto de partida a la ingeniería civil. Conocer sobre qué suelo se va a realizar una edificación es fundamental para toda obra.

El suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las activaciones de los seres vivos que sobre ella se asientan. (Carlos Crespo Villalaz, 2017). El suelo se define como “todos los fragmentos de material mineral en o cercano a la superficie de la tierra, la luna o cualquier otro cuerpo planetario, más el aire, agua, materia orgánica y otras sustancias las cuales pueden estar incluidas en él”. (Spangler & Handy, 1982).

La palabra suelos representa “todo tipo de material terroso, desde un relleno al desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas”. (Juárez & Rico, 2005).

**Figura 2.1** (a) Suelo en estado natural; (b) Modelo trifásico del suelo



**Fuente:** Rodrigo Zapata (2018)

### **2.1.1 Suelo en la ingeniería civil**

Desde el punto de vista de la ingeniería, suelo es el sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas.

Suelo en Ingeniería Civil son los sedimentos no consolidados de partículas sólidas fruto de la alteración de las rocas, o los suelos transportados por agentes como el agua, el hielo o el viento, con la contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva y que puede tener, o no materia orgánica. El suelo es un cuerpo natural heterogéneo.

El suelo es el material de construcción más abundante dentro de las prácticas de la ingeniería Civil, y constituye el soporte de las estructuras como edificaciones, vías, puentes, canales, torres, entre otros, además se utiliza como el material de terraplenes viales, muros de tierra reforzada con geotextil, diques, rellenos de adecuación de terrenos en relieves pendientes para áreas urbanas. Los suelos conforman los taludes de corte y de terraplenes viales y son estructuras que cumplen funciones diversas en los proyectos: son los elementos a estabilizar cuando se trata de taludes, y a la vez brindan estabilidad a los demás elementos que hacen parte de un tratamiento de pendientes, como los canales, las bermas, las estructuras y la vegetación que protege el suelo.

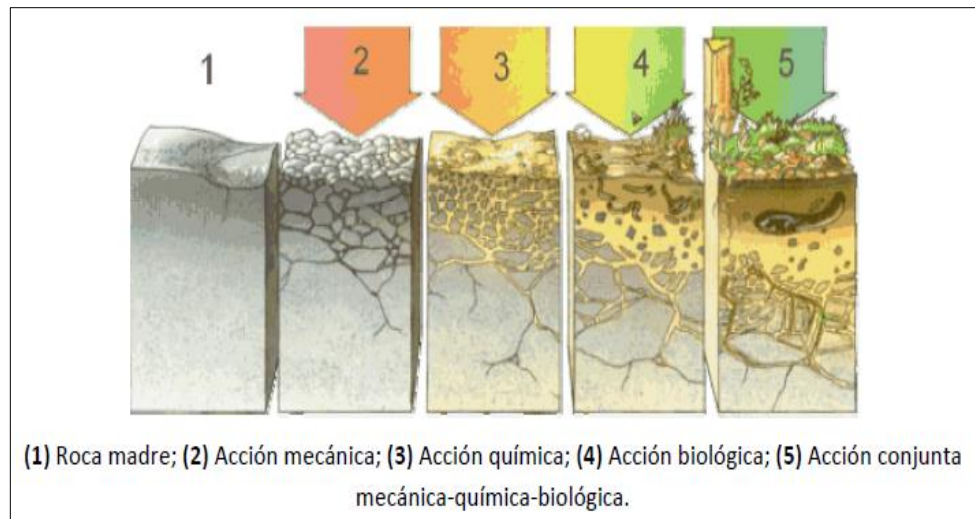
El suelo y el agua tienen vínculos muy estrechos y tanto la ausencia de agua dentro de la estructura del suelo cuando éste se seca, o el exceso hasta la saturación ejercen control sobre su peso, alteran la resistencia de ese suelo y cambia su volumen; además de la respuesta del suelo fino saturado por la aplicación de cargas estáticas, cuando se induce el flujo del agua libre, se deforma y sufre asentamiento la estructura apoyada en él. (Gonzalo Duque & Carlos Escobar, 2016).

### **2.1.2 Etapas y procesos en la formación del suelo**

En la formación de los suelos, la roca madre se ve afectada por procesos de meteorización, tanto física (desagregación) como química (alteración). Luego mediante agentes naturales los productos de la meteorización pueden ser transportados causando la erosión de aquellas rocas más superficiales de la corteza terrestre. Estos materiales se depositarán posteriormente y mediante diversos fenómenos se consolidará el suelo propiamente dicho. Los procesos de formación del suelo se denominan edafogénesis, y los factores que intervienen en este proceso son: el clima, la topografía, la acción biológica, la composición

litológica y el tiempo de actuación de todos ellos. Dentro de estas acciones debemos saber que la desagregación dará como producto gravas, arenas o limos, ya que para la formación de arcillas se requiere de transformaciones químicas. Después de la meteorización el suelo formado puede permanecer en el lugar (suelo residual) o ser transportado por agentes naturales como el agua, tanto en estado líquido como sólido, y el aire. (Rodrigo Zapata, 2018).

**Figura 2.2** Etapas y procesos en la formación del suelo



**Fuente:** Rodrigo Zapata (2018)

### 2.1.3 Factores de formación y evolución del suelo

Según Gonzalo Duque & Carlos Escobar (2016), los factores que intervienen en la formación y evolución del suelo son cinco:

**El material parental:** cuando la roca o los suelos son permeables permiten el acceso y la circulación de líquidos (agua) y gases (aire) que reaccionan con los minerales constituyentes de la roca madre.

**El tiempo:** Las deformaciones que sufre la roca y el suelo, la circulación de los líquidos y gases a través de la estructura y las reacciones químicas requieren tiempo: unos minerales sufren alteración más rápido que otros, de ahí que la alteración del suelo es heterogénea y por eso los perfiles cambian con gran frecuencia.

**El relieve:** Las pendientes, el patrón del drenaje, la orientación de la ladera y las barreras topográficas son el resultado de la combinación de la actividad tectónica y volcánica que forman el relieve y los procesos denudativos modelan el paisaje. Tanto la erosión del suelo como la acumulación están muy ligados al relieve y éste ejercer control sobre los espesores del suelo: en las áreas planas los suelos presentan mayor espesor que en las pendientes donde se erosionan.

**Los formadores biológicos:** la meteorización vinculada con los formadores biológicos o “meteorización edafoquímica” es aquella vinculada con la actividad fisiológica de la flora y fauna, soportada en las reacciones químicas donde el agua es fundamental para los procesos y en ella se originan ácidos orgánicos y gases que reaccionan con el suelo y la descomposición de la materia orgánica contribuyen a la formación del suelo.

**El clima:** la temperatura, las precipitaciones, la humedad relativa, el balance hídrico determinan la intensidad de la acción y velocidad de procesos de meteorización, formadores de los suelos. En zonas de lluvias abundantes y temperaturas altas se dan las condiciones para la generación de suelos, en zonas áridas hay poca disponibilidad de agua, reacciones químicas más lentas y cambios bruscos de temperaturas que estimulan la formación de suelos granulares sobre los suelos arcillosos. En las áreas donde los suelos están desprovistos de vegetación se presentan los ciclos de secado-humectación severos que hacen perder algunas propiedades del suelo, su funcionalidad y estabilidad como estructura dentro de la ingeniería.

## **2.2 Tipos de suelos**

Según Crespo Villalaz (2017), los principales tipos de suelos son:

### **2.2.1 Gravas**

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Cuando son arrastradas por las aguas sufren desgaste en sus aristas y por lo tanto son redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, márgenes de los ríos y en otros lugares donde las gravas han sido transportadas. Casi siempre se encuentra con mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. Sus partículas varían desde 7,62 cm (3”) hasta 2,0 mm.

### **2.2.2 Arenas**

Materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0,05 mm de diámetro. El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas; las suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. Los suelos arenosos están conformados por arenas medias y gruesas, teniendo una granulometría muy favorable para sustentar estructuras con cierta resistencia. Este es sumamente estable ante los cambios de la temperatura y humedad, siendo más estable que el arcilloso. Las cimentaciones en losa son bastante comunes en este tipo de suelos.

El gran problema de los suelos arenosos es que son muy propensos a la erosión, afectando en gran medida la cimentación y la estructura del lugar.

La gran desventaja de las arenas finas es la gran susceptibilidad que tienen ante movimientos sísmicos, ya que su granulometría tiende a densificarse produciendo efectos y daños en las cimentaciones. Al igual que ocurre con los suelos arcillosos, se recomiendan las cimentaciones profundas.

### **2.2.3 Limos**

Son suelos de granos finos con poco o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo orgánico como el producto en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0,05 mm y 0,005 mm. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar.

### **2.2.4 Arcillas**

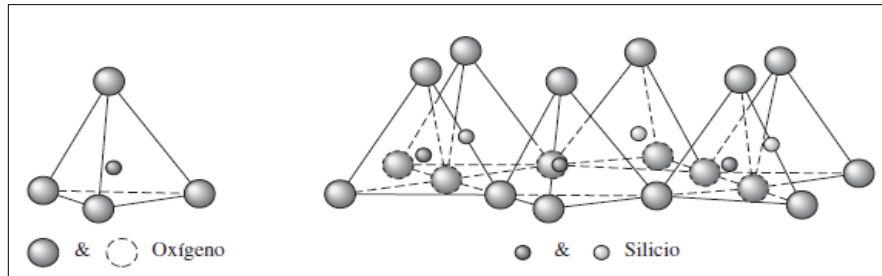
Son partículas con diámetro menor de 0,005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclado con agua. Químicamente es un silicato de aluminio hidratado, aunque en no pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratado. La estructura de estos materiales es, generalmente cristalina y complicada, y sus átomos están dispuestos en forma laminar. Las arcillas son plásticas, se

contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprime lentamente.

### 2.3 Características mineralógicas de la arcilla

Braja M. Das (2016), nos dice que los minerales de arcilla son silicatos de aluminio complejos compuestos de una de las dos unidades básicas: sílice tetraédrico y aluminio octaédrico. Cada unidad del tetraedro consiste de cuatro átomos de oxígeno que rodean un átomo de silicio. La combinación de unidades tetraédricas de sílice da una lámina de sílice. Tres átomos de oxígeno en la base de cada tetraedro son compartidos por tetraedros en la vecindad.

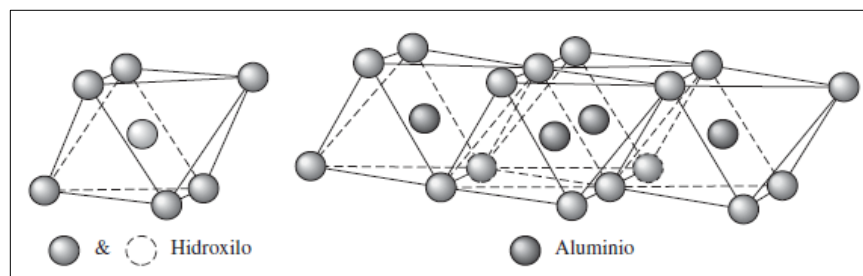
**Figura 2.3** Lámina de tetraedros



**Fuente:** Braja M. Das (2016)

Las unidades octaédricas consisten en seis hidroxilos rodeando un átomo de aluminio, y la combinación de las unidades hidroxilo de aluminio octaédricas da una capa octaédrica. (Esto también se llama una lámina de gibsita). A veces el magnesio sustituye a los átomos de aluminio en las unidades octaédricas, en cuyo caso la capa octaédrica se llama lámina de brucita.

**Figura 2.4** Lámina de octaedros



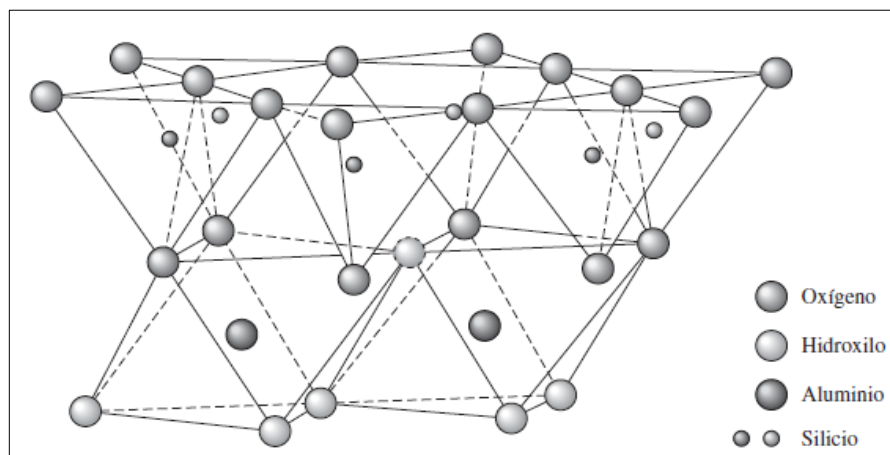
**Fuente:** Braja M. Das (2016)



En una lámina de sílice, cada átomo de silicio con una valencia positiva de 4 está ligado a cuatro átomos de oxígeno, con una valencia negativa total de 8. Sin embargo, cada átomo de oxígeno en la base del tetraedro está vinculado a dos átomos de silicio. Esto significa que el átomo de oxígeno en la parte superior de cada unidad tetraédrica tiene una valencia negativa de 1 para ser contrarrestado.

Cuando la lámina de sílice se apila sobre la lámina octaédrica, estos átomos de oxígeno reemplazan los hidroxilos para satisfacer sus enlaces de valencia.

**Figura 2.5** Lámina de sílice gibbsita elemental



**Fuente:** Braja M. Das (2016)

Según su estructura reticular, se puede clasificar a los minerales arcillosos en tres grupos: Caolinitas, illita y montmorillonita.

### **Grupo de las caolinitas**

La caolinita consiste de capas repetidas de láminas de sílice-gibbsita elementales. Cada capa es de aproximadamente  $7,2 \text{ \AA}$  de espesor. Las capas se mantienen unidas por enlaces de hidrógeno. La caolinita se produce como plaquetas, cada una con una dimensión lateral de  $1000 \text{ a } 20\,000 \text{ \AA}$  y un espesor de  $100 \text{ a } 1000 \text{ \AA}$ . El área de la superficie de las partículas de caolinita por unidad de masa es de aproximadamente  $15 \text{ m}^2/\text{g}$ . El área de superficie por unidad de masa se define como superficie específica.

## Grupo de las ilitas

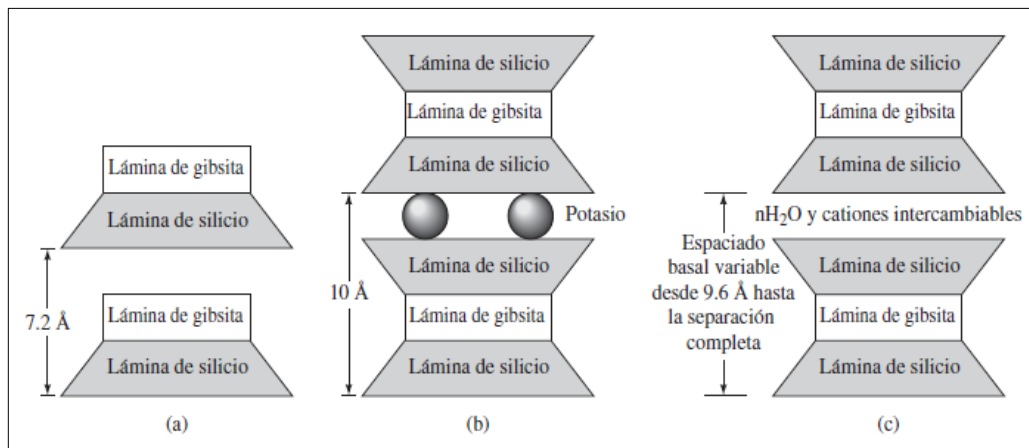
La ilita consiste de una lámina de gibsita unida a dos láminas de sílice, una en la parte superior y otra en la parte inferior. A veces se llama arcilla micácea. Las capas de ilita están unidas entre sí por iones de potasio. La carga negativa para equilibrar los iones de potasio proviene de la sustitución de aluminio por alguno de silicio en las láminas tetraédricas.

La sustitución de un elemento por otro sin ningún cambio en la forma cristalina se conoce como sustitución isomorfa. Las partículas de ilita tienen generalmente dimensiones laterales que van de 1000 a 5000 Å, y espesores de 50 a 500 Å. La superficie específica de las partículas es de aproximadamente 80 m<sup>2</sup>/g.

## Grupo de las montmorillonitas

La montmorillonita tiene una estructura similar a la de la ilita, es decir, una lámina de gibsita intercalada entre dos láminas de sílice. En la montmorillonita existe sustitución isomorfa de magnesio y hierro para el aluminio en las láminas octaédricas. Aquí no están presentes los iones de potasio, como en el caso de la ilita, y una gran cantidad de agua es atraída al espacio entre las capas. Las partículas de montmorillonita tienen dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å y espesores de 10 a 50 Å. La superficie específica es de aproximadamente 800 m<sup>2</sup>/g.

**Figura 2.6** Estructura laminar de los minerales arcillosos



**Fuente:** Braja M. Das (2016)

## **2.4 Propiedades físico químicas de las arcillas**

Emilia García & Mercedes Suárez (2005), afirman que la importancia de este grupo de minerales radica en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2  $\mu\text{m}$ )
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

### **2.4.1 Superficie específica**

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

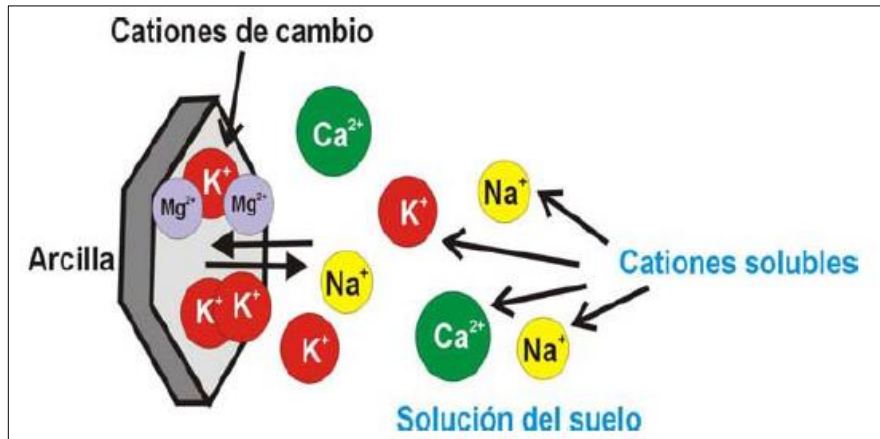
- Caolinita de elevada cristalinidad hasta 15  $\text{m}^2/\text{g}$
- Caolinita de baja cristalinidad hasta 50  $\text{m}^2/\text{g}$
- Halloisita hasta 60  $\text{m}^2/\text{g}$
- Illita hasta 50  $\text{m}^2/\text{g}$
- Montmorillonita 80-300  $\text{m}^2/\text{g}$
- Sepiolita 100-240  $\text{m}^2/\text{g}$
- Paligorskita 100-200  $\text{m}^2/\text{g}$

### **2.4.2 Capacidad de intercambio catiónico**

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma

de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral.

**Figura 2.7** Intercambio catiónico en la superficie de una arcilla



**Fuente:** Rodrigo Zapata (2018)

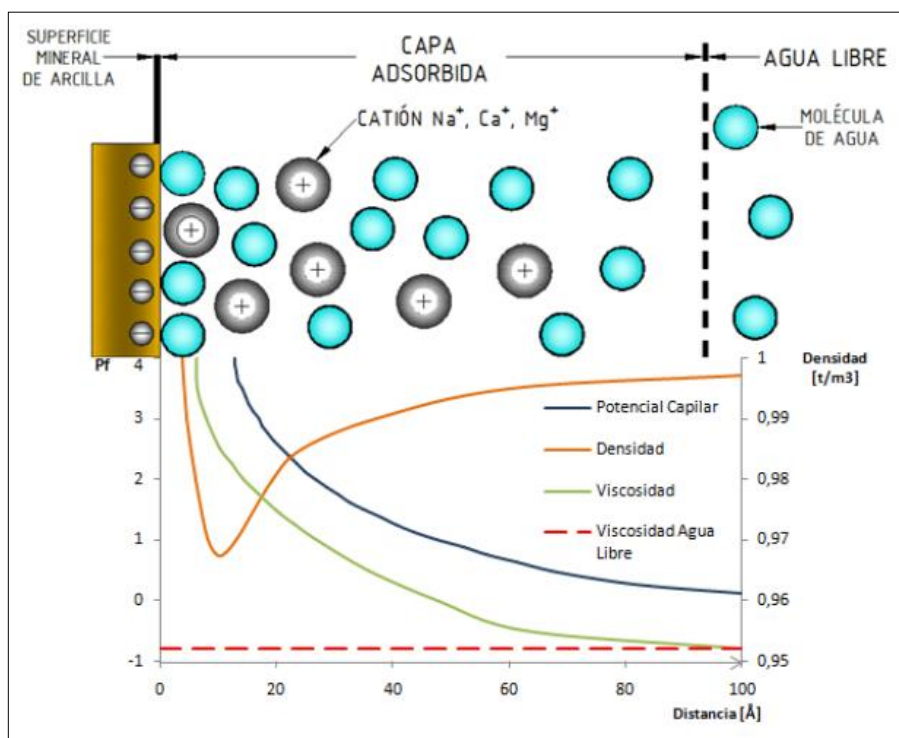
### 2.4.3 Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

**Figura 2.8** Distribución y concentración de iones entre partículas de arcilla



**Fuente:** Rodrigo Zapata (2018)

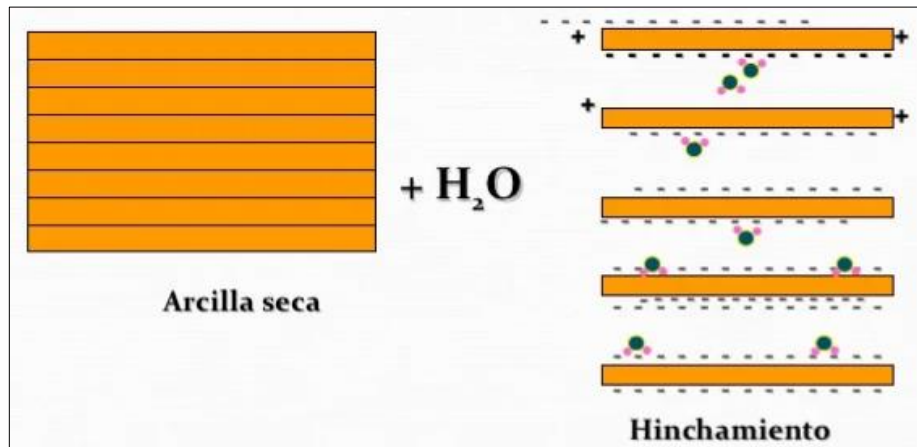
#### 2.4.4 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales

individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si, por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

**Figura 2.9** Hinchamiento en las arcillas



**Fuente:** Evelin Lizarayo (2019)

#### 2.4.5 Plasticidad de las arcillas

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso.

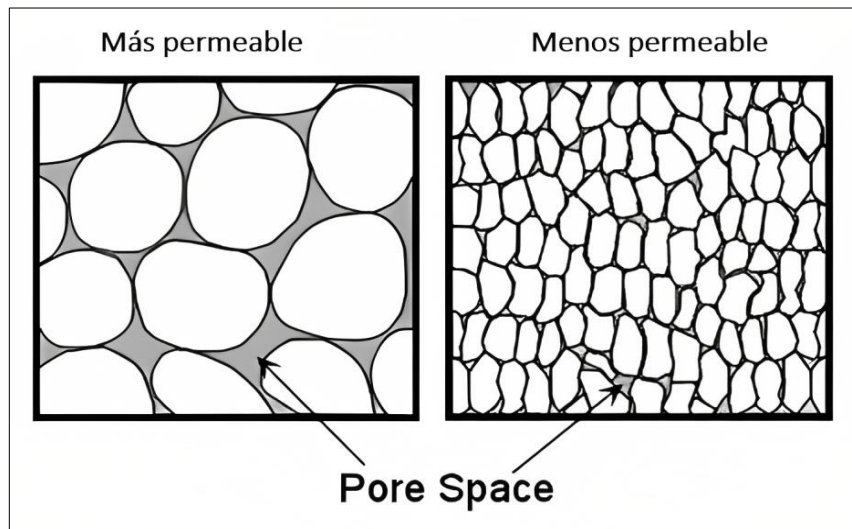
La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión

de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

#### 2.4.6 Permeabilidad

Las arcillas tienen baja permeabilidad, sus aperturas intergranulares son demasiado pequeñas para permitir la circulación rápida.

**Figura 2.10** Permeabilidad de las arcillas



**Fuente:** Evelin Lizarayo (2019)

#### 2.5 Arcillas expansivas

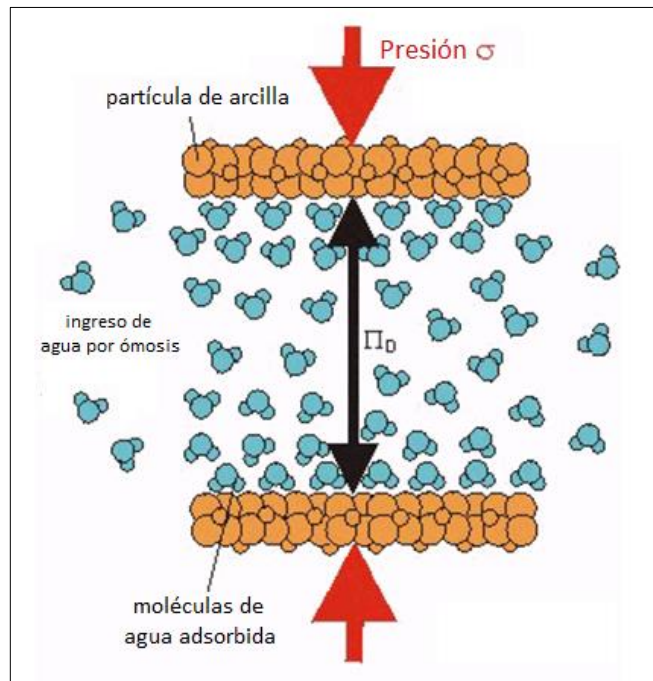
Los suelos expansivos son aquellos que parcial o totalmente saturados aumentan significativamente su volumen cuando aumenta su contenido de humedad, a carga constante. Este término implica también la disminución de volumen o contracción si la humedad se pierde, pero debe tener presente que la contracción es simplemente el proceso inverso a la expansión.

La expansividad sucede cuando las moléculas de agua quedan atrapadas en la red cristalina, entre las cadenas de silicatos de las arcillas que se encuentran unidos por enlaces débiles, pasando a ocupar mayor volumen inicial sin que ocurra reacciones químicas. (Rodrigo Zapata, 2018).

En general todo tipo de arcillas, tienen alta capacidad de retención de agua, sin embargo, existen cierto tipo de arcillas que por su composición y comportamiento son las más problemáticas, algunas son:

- Las arcillas esmectitas
- Las arcillas montmorillonitas

**Figura 2.11** Presión de hinchamiento de una arcilla expansiva



**Fuente:** Rodrigo Zapata (2018)

## 2.6 Diferencias entre las arcillas y las arenas

Las diferencias que existen entre las arcillas y las arenas son:

**Tabla 2.1** Diferencias entre las arcillas y las arenas

Arcillas	Arenas
Volumen de los poros hasta 98% máximo.	Volumen de los poros hasta 50% máximo.
Es plástica.	No es plástica.
Se retrae al secarse.	No se retrae al secarse.
Muy compresible.	No es compresible o lo es muy poco.



Arcillas	Arenas
Por carga aplicada se comprime lentamente.	Se comprime rápidamente.
Su consistencia depende de la humedad.	La humedad la afecta poco.
Tamaño menor de 0,002 mm.	Tamaño de las partículas mayor de 0,06 mm.
Presenta cohesión.	No presenta cohesión.

**Fuente:** Gonzalo y Carlos Escobar (2016)

## 2.7 Diferencias entre las arcillas y los limos

Las diferencias que existen entre las arcillas y los limos son:

**Tabla 2.2** Diferencias entre las arcillas y los limos

Arcillas	Limos
La resistencia seca es alta a muy alta, especialmente si se seca al horno.	La resistencia seca es baja, aún seca al horno.
No desprende polvo de la superficie	Desprende polvo de la superficie.
Difícilmente desmenuzable con los dedos.	Es fácilmente desmenuzable con los dedos.
Plasticidad. Los rollitos del límite plástico son tenaces, secan lentamente y permanecen finos, con humedades bajo el estado plástico. Tienen resistencia alta a muy alta.	Plasticidad. Los rollitos para el límite plástico son frágiles. Secan rápido y se agrietan fácilmente con humedad bajo el estado plástico. Tienen resistencia baja.
Dispersión. Cuando está en suspensión, tarda días a semanas, en asentarse, a menos que haya floculación.	Dispersión. Se asienta entre 15 y 60 minutos.
Menor permeabilidad.	Mayor permeabilidad.
Pueden ser expansivas	No son expansivas.

**Fuente:** Gonzalo y Carlos Escobar (2016)

## 2.8 Arcillas en la ingeniería civil

Las arcillas son, probablemente, los materiales geológicos más contradictorios desde el punto de vista de su utilidad en Ingeniería Civil. Son fuente inagotable de problemas de estabilidad en buen número de obras, pero constituyen por sí mismas un material de valiosas propiedades ingenieriles. Por otro lado, durante los últimos años, las arcillas han cobrado un interés especial en la medida que constituyen potenciales emplazamientos de repositorios de residuos nucleares de alta actividad o se considera su empleo en las barreras de ingeniería previstas para retardar o evitar la migración de radionucleidos y su interacción con la biosfera. Para la mayor parte de actuaciones sobre el terreno, las propiedades que determinan el comportamiento de un suelo pueden determinarse a partir de ensayos estandarizados de laboratorio más o menos laboriosos. La mayor parte de estos ensayos se ocupan de la evaluación de parámetros tales como el contenido de humedad, permeabilidad, porosidad, densidad, forma y tamaño de las partículas (granulometría), estructura, plasticidad, capacidad de hinchamiento, etc. Sin embargo, hay situaciones en las que es importante comprender por qué un suelo se comporta de la manera que lo hace antes de poder aplicar una solución geotécnica adecuada a un problema. Para ello es necesario conocer el suelo no sólo desde el punto de vista macroestructural sino también del microestructural, esto es, su mineralogía, composición y las interacciones con los fluidos de su entorno, principalmente agua.

**Figura 2.12** Suelo arcilloso



**Fuente:** Elaboración propia

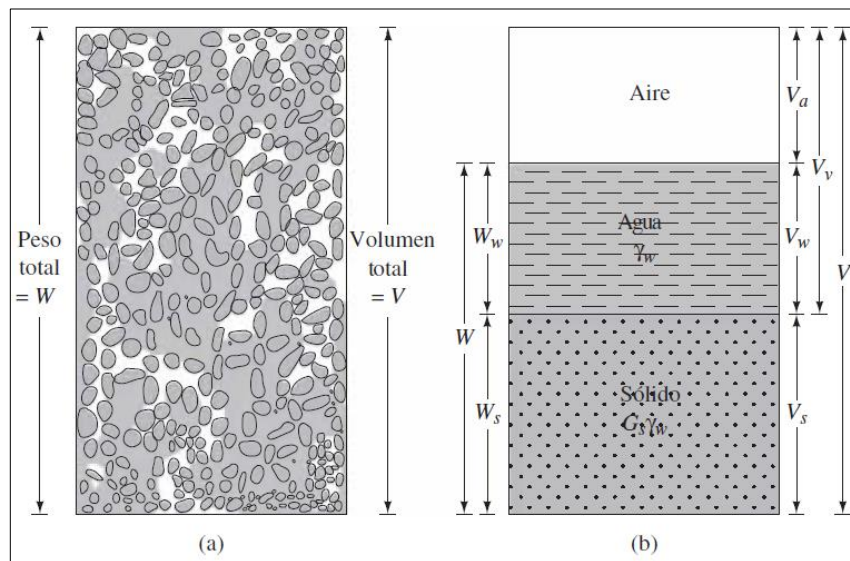
## 2.9 Propiedades físicas y mecánicas de los suelos

el suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire). La proporción de los componentes determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físico mecánicas del suelo.

### 2.9.1 Relaciones de volumen

Según Braja M. Das (2012), en la naturaleza los suelos son sistemas de tres fases que consisten en partículas de suelo sólidas, agua y aire (o gas). Para desarrollar las relaciones peso-volumen para un sólido, las tres fases se pueden separar. Con base en esta separación, se pueden definir las relaciones del volumen. Las relaciones de volumen de uso común para las tres fases en un elemento de suelo son la porosidad, relación de vacíos y el grado de saturación.

**Figura 2.13** (a) Elemento de suelo natural; (b) tres fases del elemento de suelo



**Fuente:** Braja M. Das (2012)

#### 2.9.1.1 Porosidad

La porosidad es la relación del volumen de vacíos entre el volumen de la muestra de suelo.

#### 2.9.1.2 Relación de vacíos

La relación de vacíos, es la relación del volumen de vacíos al volumen de sólidos de un suelo en una masa de suelo dada.

### 2.9.1.3 Grado de saturación

El grado de saturación, es la relación del volumen de agua en los espacios vacíos entre el volumen de vacíos, que en general se expresa como un porcentaje.

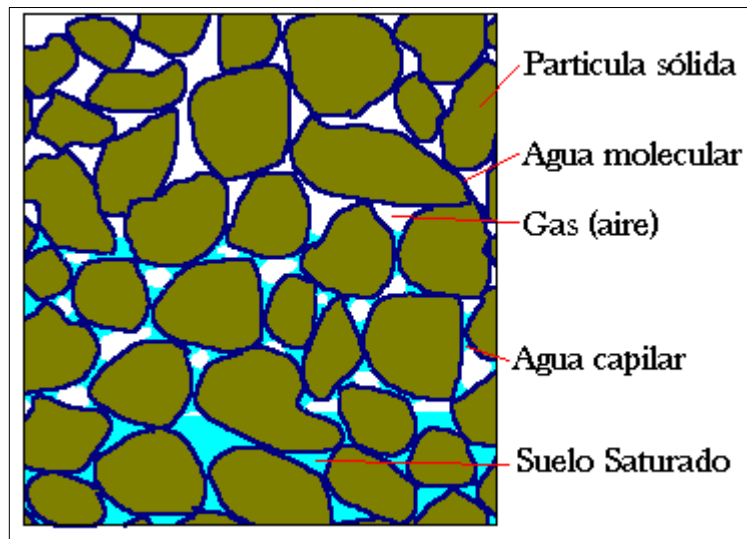
### 2.9.2 Relaciones de peso

Braja M. Das (2016), indica que las relaciones de peso comunes son el contenido de humedad y el peso unitario.

#### 2.9.2.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad también se conoce como contenido de agua y se define como la razón del peso de agua al peso de los sólidos en un volumen dado de suelo, o como la cantidad relativa de agua que se encuentra en un suelo respecto a la masa de sólidos o al volumen del suelo analizado. Se expresa en porcentaje (%), y es la relación entre el peso del agua del espécimen, y el peso de los sólidos.

**Figura 2.14** Formas del agua presente en el suelo



**Fuente:** Edwin Palacios (2016)

#### 2.9.2.2 Peso unitario

El peso unitario es el peso del suelo por unidad de volumen, se puede expresar en términos del peso de sólidos del suelo, contenido de humedad y el volumen total.

### 2.9.3 Humedad natural

Una característica importante de los suelos es su humedad natural; puesto que la resistencia de los suelos de subrasante, en especial de los finos, se encuentra directamente asociada con las condiciones de humedad y densidad que estos suelos presenten. (MTC, 2014).

### 2.9.4 Granulometría del suelo

Se puede denominar granulometría a la división de los diferentes tamaños de las partículas que tiene el suelo.

Según Braja M. Das (2012) afirma que “En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían en gran medida. Para clasificar apropiadamente un suelo, se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de un suelo de grano grueso se determina por lo general mediante un análisis granulométrico con mallas. Para un suelo de grano fino, la distribución granulométrica se puede obtener por medio del análisis del hidrómetro”.

El análisis granulométrico se refiere a la determinación de la cantidad en porcentajes de los diferentes tamaños de las partículas que constituyen en suelo. (Crespo Villalaz, 2017).

La distribución granulométrica es la división de diferentes dimensiones de las partículas de los suelos, ya que estos pueden contener diversos componentes combinados, cada partícula puede ser caracterizado por sus dimensiones, y estas dimensiones están reglamentadas para definir su clasificación por medio de valores mínimos y máximos. (Hernández, rico y del Castillo. 2002).

**Tabla 2.3** Clasificación de suelos según cada tamaño de partículas

Tipo de material		Tamaño de las partículas
Grava		2 - 60 mm
Arenas		0,06 - 2 mm
Material fino	Limo	0,002 - 0,06 mm
	Arcilla	menor a 0,002 mm

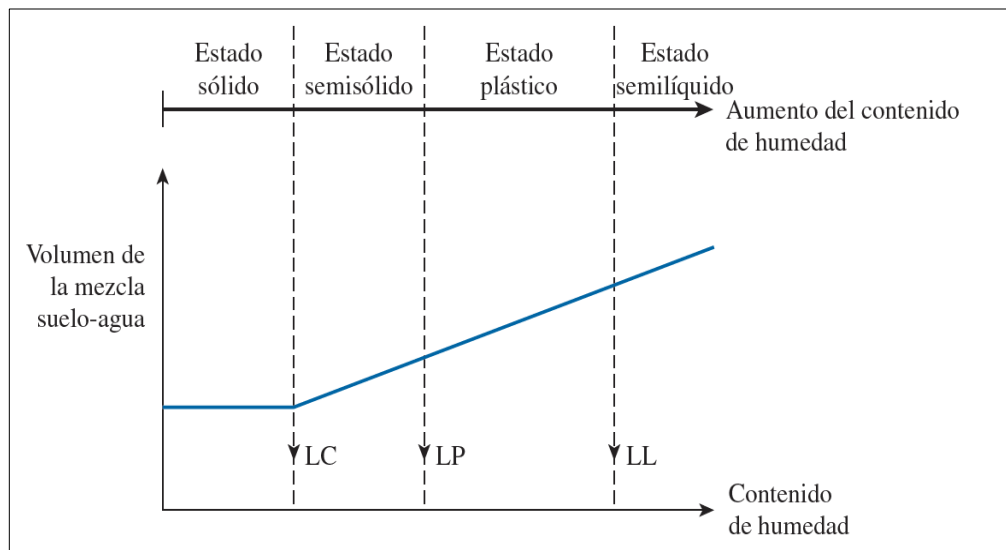
**Fuente:** Braja M. Das (2012)

### 2.9.5 Plasticidad de los suelos

En mecánica de Suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciables y sin desmoronarse ni agrietarse. (Juárez & Rico, 2005).

El autor Crespo Villalaz (2017) indica que, “La plasticidad es la propiedad que presenta los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg, quien por medio de ellos separo los cuatro estados de consistencia de los suelos coherentes. Límite líquido (L.L), límite plástico (L.P) y límite de contracción (L.C)”.

**Figura 2.15** Límites de consistencia de suelos de grano fino



**Fuente:** Braja M. Das (2012)

#### 2.9.5.1 Límite líquido

Se define como el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra, cuando el suelo pasa del estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse. La cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula. (Crespo Villalaz, 2017).

El límite líquido es el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado líquido a uno plástico. Se determina utilizando la copa de Casagrande (designación de prueba ASTM D-4318) y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12,7 mm mediante 25 golpes. (Braja M. Das, 2012).

### 2.9.5.2 Límite plástico

Se define como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado plástico a uno semisólido, así también como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3,18 mm de diámetro. La prueba se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal (designación de prueba ASTM D-4318). (Braja M. Das, 2012).

### 2.9.5.3 Límite de contracción

El Límite de Contracción se define como el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, con el cual una reducción de agua no ocasiona la disminución en el volumen del suelo. (Crespo Villalaz, 2017).

### 2.9.5.4 Índice de plasticidad

Se denomina Índice de Plasticidad a la diferencia numérica entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP), e indica el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico tal como lo definen los ensayos. (Crespo Villalaz, 2004).

**Tabla 2.4** Clasificación de suelos según índice de plasticidad

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

**Fuente:** Ministerio de transportes y comunicaciones (2014)

## **2.9.6 Clasificación de suelos**

Los suelos con propiedades similares pueden ser clasificados en grupos y subgrupos en función de las características mecánicas y su comportamiento para la ingeniería. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada. En la actualidad, dos elaborados sistemas de clasificación que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles. Se trata del el Sistema de Clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS. (Braja M. Das, 2016).

### **2.9.6.1 Sistema de clasificación AASHTO**

De acuerdo con la forma presente de este sistema, los suelos se pueden clasificar según ocho grupos principales, A-1 a A-8, con base en su distribución granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad. Los suelos listados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales de grano grueso, y aquellos en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son materiales de grano fino. La turba, el fango y otros suelos altamente orgánicos se clasifican en el grupo A-8 y se identifican mediante una inspección visual.

Para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material de capa subrasante de un camino, también se desarrolló un número al que se le refiere como índice de grupo (IG). Entre mayor sea el valor del índice de grupo para un suelo dado, más deficiente será el desempeño del suelo como capa subrasante. Un índice de grupo de 20 o mayor indica un material muy deficiente para utilizarlo como capa subrasante. El índice de grupo para suelos que se encuentran ubicados en los grupos A-1-a, A-1-b, A-3, A-2-4 y A-2-5 siempre es cero. (Braja M. Das, 2012).



**Figura 2.16** Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO

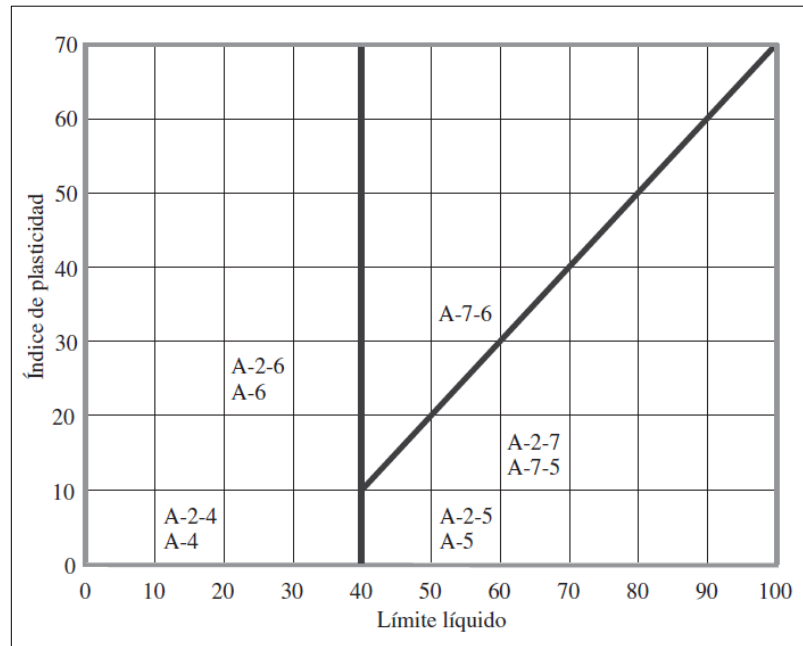
Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
	A-1			A-2			
	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Clasificación de grupo							
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10	50 máx						
Malla núm. 40	30 máx	50 máx	51 mín				
Malla núm. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Para la fracción que pasa							
Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (IP)	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Clasificación de la capa	Excelente a buena						
Clasificación general	Materiales de limo y arcilla (más de 35% de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
	A-4	A-5	A-6	A-7			
Clasificación de grupo				A-7-5 <sup>a</sup> A-7-6 <sup>b</sup>			
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10							
Malla núm. 40							
Malla núm. 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín			
Para la fracción que pasa							
Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín			
Índice de plasticidad (IP)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín			
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos		Principalmente suelos arcillosos				
Calificación subrasante	Regular a malo						

<sup>a</sup>Si  $IP \leq LL - 30$ , la clasificación es A-7-5.  
<sup>b</sup>Si  $IP > LL - 30$ , la clasificación es A-7-6.

**Fuente:** Braja M. Das (2012)

La figura 2.16 muestra un gráfico del rango del límite líquido y el índice de plasticidad de los suelos que se dividen en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7. Para la evaluación de la calidad de un suelo como un material de subrasante carretera, también se incorpora un número llamado índice de grupo (IG) a los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe entre paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo.

**Figura 2.17** Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos



**Fuente:** Braja M. Das (2012)

### 2.9.6.2 Sistema unificado de clasificación de suelos SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System) fue propuesto originalmente por Casagrande en 1942 y más tarde lo revisó y adoptó el United States Bureau of Reclamation y el US Army Corps of Engineers. En la actualidad el sistema se utiliza prácticamente en todo el trabajo geotécnico. (Braja M. Das, 2012).

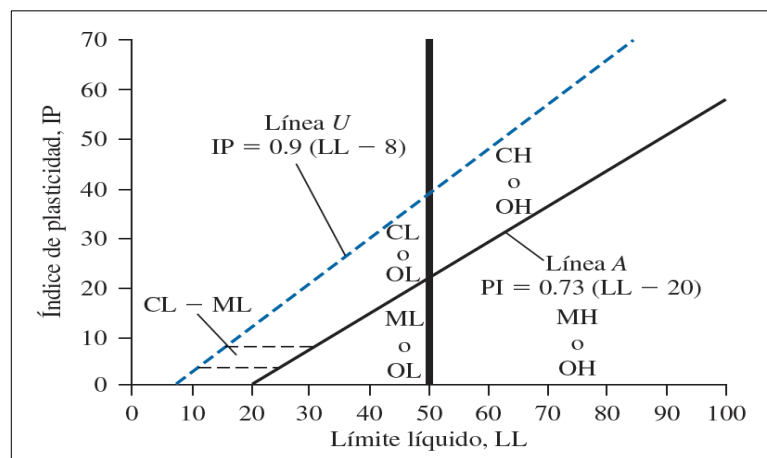
**Tabla 2.5** Símbolos utilizados en la clasificación SUCS

Descripción	Símbolo
Grava	G
Arena	S
Limo	M
Arcilla	C
Limos orgánicos y arcilla	O
Turba y suelos altamente orgánicos	Pt
Bien graduado	W
Mal graduado	P
Alta plasticidad (límite líquido mayor a 50)	H
Baja plasticidad (límite líquido menor a 50)	L

**Fuente:** Braja M. Das (2012)

Igualmente, Casagrande propuso la carta de plasticidad la cual relaciona en una gráfica el límite líquido frente al índice de plasticidad. Dentro de la gráfica, además de la línea que separa los suelos de alta plasticidad de los de baja plasticidad, definió las líneas A y U. La primera línea separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos mediante la expresión  $PI = 0,73 (LL - 20)$  y la línea U es el límite superior de la relación del índice de plasticidad con el límite líquido. Se define como  $PI = 0,9 (LL - 8)$ .

**Figura 2.18** Carta de plasticidad

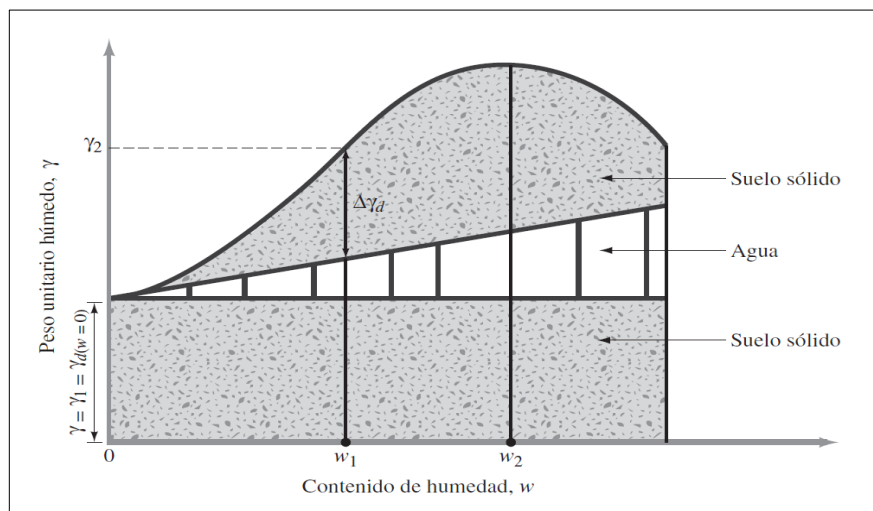


**Fuente:** Braja M. Das (2012)

### 2.9.7 Compactación de suelos

Según Braja M. Das (2016), la compactación es la consolidación del suelo por la eliminación de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso unitario seco. Cuando se añade agua a la tierra durante la compactación, ésta actúa como agente suavizante sobre las partículas del suelo. Éstas se deslizan una sobre la otra y se mueven en una posición densamente empaquetadas. El peso unitario seco después de la compactación primero aumenta a medida que se incrementa el contenido de humedad.

**Figura 2.19** Principios de compactación



**Fuente:** Braja M. Das (2016)

#### 2.9.7.1 Compactación Proctor estándar

En la prueba Proctor estándar, el suelo se compacta en un molde que tiene un volumen de  $943,3 \text{ cm}^3$ . El diámetro del molde es  $101,6 \text{ mm}$ . Durante la prueba de laboratorio el molde se une a una placa de base en la parte inferior y a una extensión en la parte superior. El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego es compactado en tres capas iguales por un martillo que entrega 25 golpes a cada capa. El martillo pesa  $24,4 \text{ N}$  y tiene una caída de  $304,8 \text{ mm}$ .

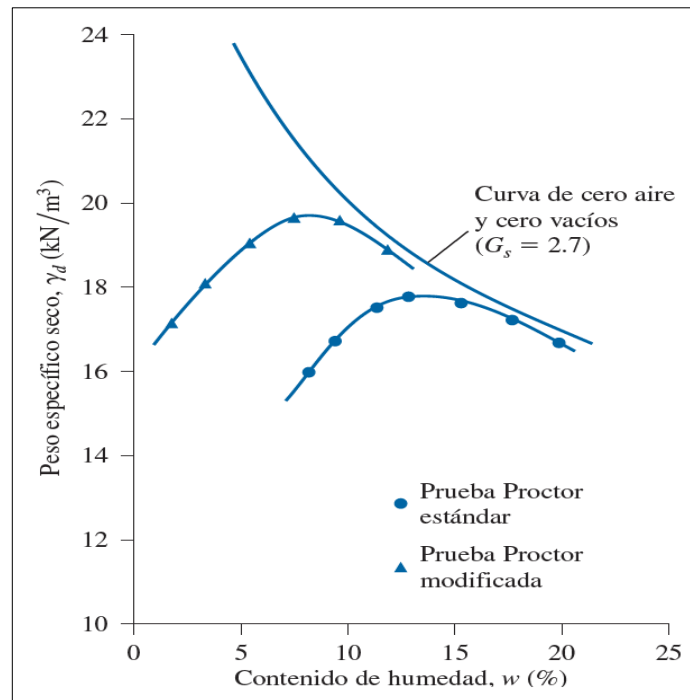
#### 2.9.7.2 Compactación Proctor modificado

Con el desarrollo de rodillos pesados y su uso en la compactación en campo, la prueba Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. Esto se

refiere a veces como la prueba Proctor modificada (Norma ASTM D-1557 y Norma AASHTO T 180). Para la realización de la prueba Proctor modificada se utiliza el mismo molde, con un volumen de  $943,3 \text{ cm}^3$ , como en el caso de la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un martillo que pesa  $44,5 \text{ N}$  (masa= $4,536 \text{ kg}$ ) y tiene una caída de  $457,2 \text{ mm}$ . El número de golpes de martillo para cada capa se mantiene en 25, como en el caso de la prueba Proctor estándar.

Debido a que el esfuerzo de compactación aumenta, los resultados de la prueba Proctor modificada resulta en un aumento del peso unitario seco máximo de suelo. El aumento del peso unitario seco máximo se acompaña de una disminución del contenido de humedad óptimo. Las especificaciones dadas para las pruebas Proctor adoptadas por ASTM y AASHTO sobre el volumen del molde ( $943,3 \text{ cm}^3$ ) y el número de golpes (25 golpes/capa) son generalmente las adoptadas para los suelos de grano fino que pasan el tamiz N°4. Sin embargo, en cada designación de prueba los tres diferentes métodos sugeridos reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de las partículas en un agregado de suelo usado para la prueba.

**Figura 2.20** Curvas de compactación Proctor estándar y modificada



**Fuente:** Braja M. Das (2012)

### 2.9.8 Relación de soporte de California CBR

El ensayo de CBR sirve de base al procedimiento comúnmente para dimensionar los espesores de los pavimentos, tratándose en realidad de una prueba de funcionamiento que se le hace al suelo saturado y compactado. (Herráez & Moreno, 2019).

Según Huang Yang (2013), el CBR es una medida de la resistencia relativa de un suelo a la penetración de una carga estática. Es un parámetro importante en el diseño de pavimentos y se utiliza para determinar la capacidad portante del suelo subyacente y su capacidad para soportar las cargas del tráfico. El valor de CBR depende del tipo de suelo, el contenido de humedad, la densidad y la compactación.

**Tabla 2.6** Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Subrasante
5 - 8	Mala	Subrasante
8 - 20	Regular - Buena	Subrasante
20 - 30	Excelente	Subrasante
30 - 60	Buena	Subbase
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

**Fuente:** Leiva et al. (2017)

### 2.10 Subrasante

Es el suelo de fundación de la estructura del Pavimento. Este suelo debe presentar una buena capacidad de soporte y debe estar libre de materias orgánicas, ya que va hacer la encargada de soportar y resistir todas las capas que componen la estructura del pavimento.

Como se mencionó este terreno debe ser de buena calidad para ser utilizado como material de Subrasante. Los suelos que se consideraran de buena calidad según AASHTO son los clasificados en los siguientes grupos: A-1; A-2; A-3. Y los suelos clasificados en los grupos A-4; A-5; A-6; A-7, solo podrán ser utilizados según lo indica el estudio de laboratorio de suelo, y generalmente se les hace un mejoramiento a estos suelos. Y en el

caso de encontrarse con suelos del grupo A-8 estos deberán ser removidos totalmente, ya que son suelos orgánicos y deberán extraerse en un espesor determinado por el laboratorio de suelos.

La subrasante se compactará a la densidad mínima de 95 % de la D.M.S.C., en 0.30 m. de profundidad como mínimo.

Según Jesús Cárdenas (2017), la subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre el cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.

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 física-química con aditivos como el cemento Portland, la cal, el asfalto, ceniza volante entre otras. De la calidad de ésta depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea este flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas del tránsito. (Álvarez, 2013).

### **2.10.1 Caracterización de la subrasante**

La caracterización de los suelos de subrasante comprende las siguientes etapas:

- Evaluación topográfica.
- Exploración de la subrasante.
- Definición del perfil y delimitación de áreas homogéneas.
- Ejecución de ensayos de resistencia sobre los suelos predominantes.
- Determinación del valor de resistencia o de respuesta de diseño para cada área homogénea.

### **2.10.2 Propiedades de la subrasante**

**Propiedades físicas:** Las propiedades físicas están relacionadas con el tipo de material a utilizar y las características constructivas de los mismos. Granulometría (propiedades iniciales de los suelos), clasificación de los suelos, relación humedad - densidad.

**Propiedades ingenieriles:** Dan un estimado de la calidad de los materiales para las vías. Los ensayos a considerar son: módulo resiliente, módulo de poisson, valor de soporte de suelo, y módulo de reacción de la subrasante (k).

### 2.10.3 Requisitos para una Subrasante

Según el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), las especificaciones técnicas que debe cumplir una subrasante son:

**Tabla 2.7** Especificaciones técnicas para una subrasante

Característica	Valor
Límite Líquido (%)	$\leq 40$
Índice de Plasticidad (%)	$< 10$
Expansión en prueba C.B.R. (%)	$< 2$
Valor Soporte de California (%)	$\geq 5$

**Fuente:** INVÍAS (2012)

## 2.11 Pavimento

El pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. (ministerio de transportes y comunicaciones, 2014).

Hay una gran diversidad de tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitaran y del volumen de tráfico. Un pavimento difícilmente sufre una ruptura catastrófica, a menos que exista un error en el proyecto geotécnico en casos como los de pavimentos asentados en terraplenes sobre suelos expansivos.

Los pavimentos están formados por capas de resistencia decreciente con la profundidad, generalmente se componen de: carpeta de rodamiento (que puede ser asfáltica o de hormigón), base y subbase apoyado todo este conjunto sobre la subrasante. En algunos casos puede faltar alguna de estas capas.

### 2.11.1 Capa subrasante

Generalmente es el terreno natural en la cual se apoya toda la estructura del pavimento, es decir que no forma parte de la estructura en sí. Sin embargo, la capacidad soporte de la



subrasante es un factor básico que afecta directamente la selección de los espesores totales de las capas del pavimento. Su finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo del terraplén, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo del terraplén contaminen el pavimento y economizar los espesores de pavimento.

### 2.11.2 Capa sub base

Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además, se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular o tratada con asfalto, cal o cemento

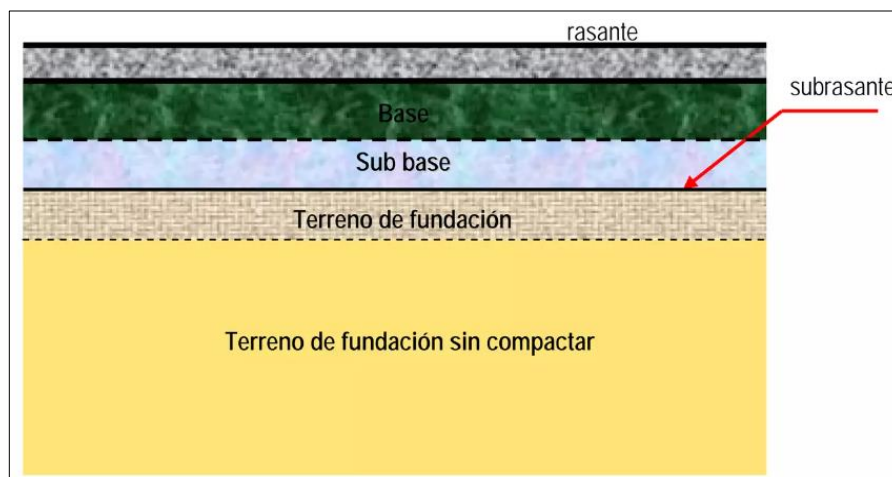
### 2.11.3 Capa base

Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante o será tratada con asfalto, cal o cemento.

### 2.11.4 Capa de rodadura

Es la parte superior de un pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto de cemento Portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito. (ministerio de transportes y comunicaciones, 2014).

**Figura 2.21** Estructura del pavimento



**Fuente:** Ever Zanabria (2014)

## **2.12 Estabilización de suelos**

La estabilización tiene como finalidad procurar por medio de los agentes estabilizantes, mejorar las propiedades geotécnicas de los suelos y lograr que este sea apto para el proceso constructivo. (Fajardo & Vásquez, 2014).

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. En cambio, cuando se estabiliza una subbase granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como subbase o base granular tratada (con cemento o con cal o con asfalto, etc.). (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2014).

El objeto de la estabilización es variar sus condiciones elasto-resistentes y de durabilidad para mejorar su respuesta frente a la acción deformante y destructora de las cargas del tránsito, y de los factores climáticos. En palabras más simples es modificar algunas propiedades naturales del suelo, para poder utilizarlo en reemplazo de otros materiales escasos o demasiado costosos. El campo de la aplicación de la estabilización de suelos es muy amplio y depende entre otras cosas, de la clasificación del camino (subrasante, subbase y base). (S/Rev, 2004).

### **2.12.1 Criterio para establecer la estabilización de suelos.**

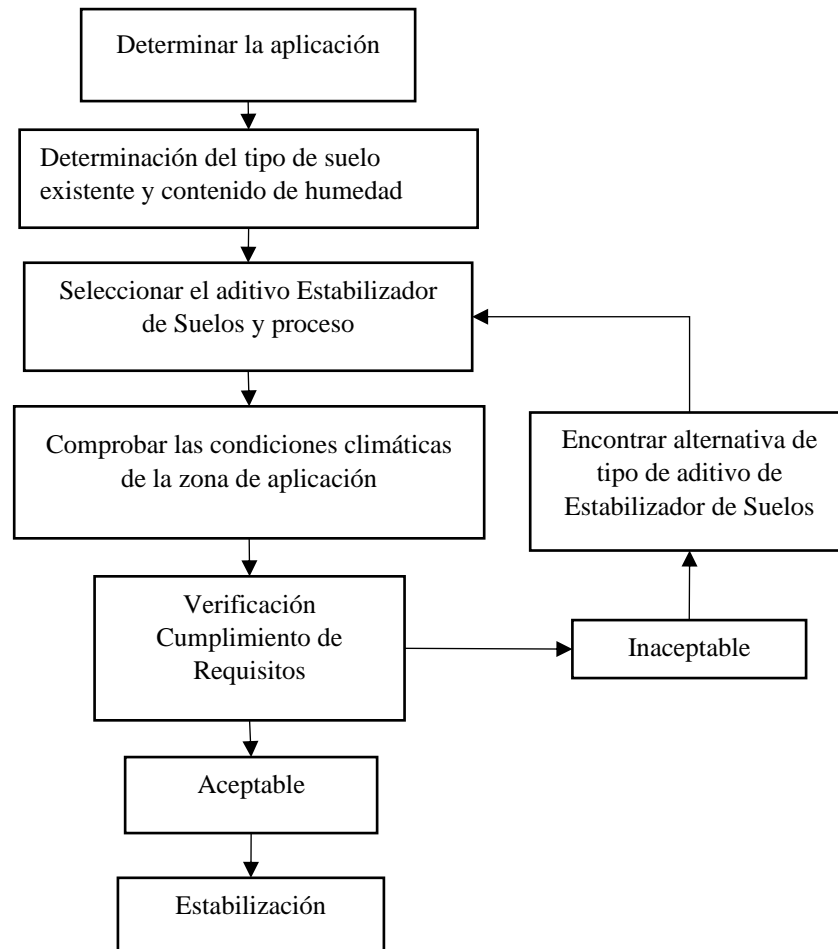
El diseño de estabilizaciones con agentes estabilizantes, consiste en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo con la cual se determina el tipo y cantidad de agente estabilizante, así como el procedimiento para efectuar la estabilización. El método de diseño obviamente depende del uso que se pretenda dar al suelo estabilizado. (Garnica, Pérez, Gómez, & Obil, 2002).

Para establecer un tipo de estabilizante de suelos es necesario determinar el tipo de suelo existente. Los suelos que predominantemente se encuentran en este ámbito son: los limos, las arcillas, las arenas limosas o arcillosas. (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2014).

los factores que se consideran al seleccionar el método más conveniente de estabilización son:

- Tipo de suelo a estabilizar.
- Uso propuesto del suelo estabilizado.
- Tipo de aditivo estabilizador de suelos.
- Experiencia en el tipo de estabilización que se aplicará.
- Disponibilidad del tipo de aditivo estabilizador.
- Disponibilidad del equipo adecuado.
- Costos comparativos.

**Figura 2.22** Criterios para estabilización de suelos



**Fuente:** Ministerio de transportes y comunicaciones (2014)

### **2.12.2 Métodos de estabilización de suelos**

El método de estabilización a utilizar depende directamente del tipo de suelo y de la propiedad que se pretenda modificar para que cumpla con las condiciones necesarias.

#### **2.12.3 Estabilización mecánica**

La estabilización mecánica de suelos se realiza generalmente por compactación, lo que se busca por medio de este método es reducir el volumen de vacíos de los suelos, densificar el material, y reducir los asentamientos futuros.

Con la estabilización mecánica se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia, es decir obtener una buena compactación y densificación del material portante. (Fajardo & Vásquez, 2014).

Braja M. Das (2016) indica que, la estabilización mecánica implica metodologías que mejoran las propiedades de ingeniería de los suelos seleccionados sin la adición de agentes u otras energías de unión de partículas. En otras palabras, no hay efectos químicos o de unión incluidos en esta metodología.

#### **2.12.4 Estabilización física**

Tiene como objetivo la obtención de una adecuada granulometría, mediante el agregado de materiales granulares o cohesivos o ambos a la vez, al primitivo suelo. (Fajardo & Vásquez, 2014).

##### **2.12.4.1 Mezcla de suelos**

Esta técnica se basa en la mezcla de dos o más suelos con propiedades complementarias, de tal forma que se logre obtener un nuevo material de mayor calidad. Las propiedades que generalmente se pretenden mejorar son la plasticidad del suelo y la granulometría. Por si solo este método de mejoramiento no logra alcanzar los efectos deseados, por lo que generalmente va acompañada de la compactación del suelo.

##### **2.12.4.2 Utilización de geotextiles**

Estos materiales son telas especiales permeables no biodegradables que se emplean como filtros y para controlar la erosión de suelos y el transporte de lodos.

### 2.12.5 Estabilización química

Es la aplicación de un agente estabilizador químico que tiene como objetivo estabilizar el suelo al mezclarse con este. Estabilización química, que se refiere al cambio de las propiedades del suelo por efectos físico-químicos de superficie mediante la adición de cal, cemento, asfalto, cloruro de sodio, permeabilizantes entre otro. (Fajardo & Vásquez, 2014).

Se refiere a utilizar tecnología ya estudiada, que se basa en la aplicación de un producto químico, el cual se debe mezclar homogéneamente con el suelo a tratar, para lograr mejorar sus propiedades. (Pérez, 2014).

La estabilización química implica la aplicación de aditivos químicos para mejorar el comportamiento de los suelos. Se utiliza para mejorar la manejabilidad del suelo, haciendo el material más fácil de usar como material de construcción. También se usa para reducir la plasticidad y el potencial de expansión-contracción. Si las arcillas son dispersivas, se utiliza para flocular las partículas. Cuando las arcillas son difíciles de compactar, se pueden añadir productos químicos para dispersar ligeramente sus partículas y ayudar en el proceso. (Braja M. Das, 2016).

las sustancias químicas usadas como agentes estabilizadores deben de tener características tales como:

- **Cal:** Ayuda a los suelos arcillosos a reducir su plasticidad.
- **Cemento portland:** La firmeza de los suelos aumenta y se emplea arenas o gravas finas.
- **Productos asfálticos:** Material triturado sin cohesión.
- **Cloruro de sodio:** Impermeabilizan y reducen los polvos.
- **Cloruro de calcio:** Impermeabilizan y reducen los polvos.
- **Escorias de fundición:** La carpeta asfáltica para darle mayor dureza, impermeabilizarla y aumenta su vida útil. Para la estabilización de un suelo se espera lograr una estabilidad volumétrica, resistencia mecánica.

- **Polímeros:** La carpeta asfáltica para darle mayor dureza, impermeabilizarla y aumenta su vida útil. Para la estabilización de un suelo se espera lograr una estabilidad volumétrica, resistencia mecánica.
- **Hule de neumáticos:** La carpeta asfáltica para darle mayor dureza, impermeabilizarla y aumenta su vida útil. Para la estabilización de un suelo se espera lograr una estabilidad volumétrica, resistencia mecánica.

### 2.12.6 Estabilización mixta

La estabilización mixta de suelos es una técnica de mejoramiento de suelos que combina dos o más aditivos para mejorar las propiedades del suelo. Esta técnica se utiliza comúnmente en la construcción de carreteras, aeropuertos y cimientos para mejorar la resistencia, la durabilidad y la estabilidad del suelo. La estabilización mixta se empezó a realizar a partir del año 2006, primero con la cal y luego con el cemento.

Según Muntohar et al. (2018), la estabilización mixta de suelos puede mejorar significativamente las propiedades mecánicas del suelo, incluyendo la resistencia a la compresión, la resistencia al corte y la rigidez del suelo. Además, la adición de múltiples aditivos puede ayudar a mejorar las propiedades hidráulicas del suelo, como la permeabilidad y la capacidad de retener agua.

Al elevar la cal el pH del suelo estabilizado hasta valores de 12,4, se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos portland, incrementan la resistencia mecánica. Esta reacción de tipo puzolánico es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo tratado. Cualquiera de los efectos anteriores, conjunta o separadamente, pueden aprovecharse para mejorar el efecto de las cales sobre ciertos suelos cuando se van a tratar con otros ligantes, como suele ser el caso del cemento. En el caso de que los suelos a tratar con cemento, para su colocación en capas de coronación o de firmes, presenten humedades excesivas y/o tengan cierta plasticidad, la corrección previa de estos problemas es mediante un leve tratamiento con cal (porcentajes en torno al 1 por ciento), permite optimizar la acción del cemento sobre el suelo, reduciendo su dosificación necesaria y evitando los riesgos que esto conlleva. (Sampedro, 2005).

## **2.13 Ventajas de los suelos estabilizados**

IECA et al. (2012), indica que entre las ventajas pueden citarse:

### **2.13.1 Ventajas técnicas**

- Permiten el empleo de los suelos de la traza, mejorando sus características hasta el grado deseado.
- Proporcionan una elevada capacidad de soporte a la explanada, con lo que aumenta la vida de servicio del firme.
- Aseguran la estabilidad de la explanada, tanto por su insensibilidad al agua y a la helada, evitando así cambios de volumen por hinchamiento o retracción, como por su resistencia a la erosión.
- Disminuyen las tracciones en las capas del firme, aumentando con ello su vida útil.
- Pueden permitir el paso inmediato del tráfico de obra.

### **2.13.2 Ventajas económicas y ambientales**

- Un mayor empleo de suelos y otros materiales de la traza, a veces de características iniciales inadecuadas. Esto es particularmente interesante por las restricciones actuales para el uso de préstamos y vertederos. En ocasiones incluso no existen suelos aprovechables a una distancia aceptable.
- Un ahorro en el transporte de materiales.
- Un acortamiento de los plazos de ejecución, dado que el proceso de incorporación del conglomerante y de mezcla del suelo con el mismo se realiza con equipos específicos de alto rendimiento.
- La obtención de cimientos de firme de mayor capacidad de soporte permite un ahorro en las capas de firme, tanto en su constitución como en su ejecución.

Aunque las ventajas ambientales están ligadas a las económicas, las primeras van cobrando preponderancia y tienen que ser atendidas con prioridad.

## **2.14 Estabilización del suelo con hidróxido de calcio y cemento**

### **2.14.1 Cal**

La cal se produce a partir de la calcinación de las rocas calizas a temperaturas altas que van desde los 880° y 900°, y está constituido principalmente por oxido de calcio (CaO) y otros componentes.

#### **2.14.1.1 Cal viva (óxido de calcio)**

Tipo de cal obtenido por calcinación que, al desprender dióxido de carbono, se convierte en oxido de calcio (CaO), y así, en presencia de agua poder obtener los morteros de cal para realizar tareas de estabilización. Algunas de sus ventajas se traducen en lo económico, pues al existir cantidad de este material se reducen costos por traslado. En cuanto a desventajas, la hidratación requiere un cuidado especial y existen problemas de seguridad durante la aplicación.

**Figura 2.23** Cal viva (óxido de calcio)



**Fuente:** María Auccalla (2019)

#### **2.14.1.2 Cal hidratada (hidróxido de calcio)**

La Cal apagada proviene de la cal viva cuando al combinarse con el agua, pasa a transformarse de óxido a hidróxido de calcio y una vez apagada (hidratada), se aplica en la construcción. Se presenta en forma de pasta, lechada o suspensión de cal en agua, o incluso en forma de polvo seco. Entre sus ventajas, se encuentra en la facilidad de su aplicación, tiene mayor efectividad en suelos con poca humedad. En cuanto a desventajas, se genera polvo a la hora de la aplicación, mayor costo de traslado debido a su peso



volumétrico, la dosificación se pierde en lugares con mucho viento, el proceso de hidratación es más caro ya que la mayoría de las veces se realiza en plantas especializadas.

**Figura 2.24** Cal hidratada (hidróxido de calcio)



**Fuente:** Flor Gonzales (2018)

#### 2.14.2 Ventajas e inconvenientes de las formas de presentación de la cal

**Tabla 2.8** Ventajas e inconvenientes de las formas de presentación de la cal

Forma	Ventajas	Inconvenientes
Cal Viva (Polvo)	La proporción de óxido de calcio es más alta para igual peso	Es un material inestable para su almacenamiento
	Permite trabajar en más épocas del año (la cal calienta el suelo)	Su aplicación es peligrosa
	Ahorra costos de transporte	Genera la emisión de polvo en la extensión
	Al tener mayor densidad aparentemente su almacenamiento es más económico	Requiere normalmente la aplicación de agua posterior para su empleo y para su apagado
	Su aplicación es más rápida que en lechada	

Forma	Ventajas	Inconvenientes
Cal Apagada  (Polvo)	No se presenta riesgos de aplicación	Requiere más cantidad para proporcionar la misma actividad que la cal viva
	Su aplicación es más rápida que en lechada	Genera la emisión de polvo en la extensión
Cal Apagada  (Lechada)	Sirve para humectar el medio que lo recibe a la vez que se aplica	Su transporte se encarece porque se mueve en agua
	Es más fácil asegurar una distribución homogénea	Requiere incorporar medios especiales de almacenamiento y extensión

**Fuente:** Juan Bauzá (2015)

### 2.14.3 Estabilización del suelo con cal

Braja M. Das (2016) indica que, los tipos de cal utilizados para estabilizar los suelos de grano fino son cal hidratada alta en calcio, cal viva calcítica, cal dolomítica monohidratada y cal viva dolomítica. Cuando se añade cal a los suelos arcillosos, ocurren dos reacciones químicas puzzolánicas: intercambio catiónico y floculación-aglomeración. En el intercambio de cationes y las reacciones de floculación-aglomeración los cationes monovalentes generalmente asociados con las arcillas son remplazados por los iones de calcio divalentes. La aglomeración-floculación produce un cambio en la textura de los suelos de arcilla. Las partículas de arcilla tienden a agruparse para formar partículas más grandes, con lo cual disminuye el límite líquido, aumenta el límite plástico, disminuye el índice de plasticidad, aumenta el límite de contracción, aumenta la manejabilidad y mejoran las propiedades de resistencia y deformación de un suelo.

La cal más utilizada para el tratamiento de suelos es la cal alta en calcio, que contiene un máximo de 5% de óxido o hidróxido de magnesio. Según el contenido de óxido de magnesio, las cales se dividen en calcicas (CL), cuando su contenido de MgO es inferior al 5%, y dolomíticas (DL), cuando dicho contenido es superior al 5%. (Lime, 2006).

La cal que se use para la estabilización de suelo-cal puede ser cal viva o hidratada. Al mezclar el suelo con la cal, se produce una reacción rápida de floculación e intercambio iónico, seguida de otra muy lenta de tipo puzolánico, con formación de nuevos productos químicos. La sílice y alúmina de las partículas del suelo se combinan con la cal en presencia de agua para formar silicatos y aluminatos cálcicos insolubles. Uno de los efectos más importantes de la cal en el suelo, es el de cambiar apreciablemente su plasticidad. También aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite la densificación de suelos de elevada humedad natural, que de otro modo no permitirían la construcción de la capa de rodadura sobre ellos. (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2014).

Conviene destacar que la proporción de cal no debe bajar de 3% en peso ni superar el 8%. Un exceso de este aditivo en la mezcla con el suelo no solo no mejora, sino que le hace perder su calidad. (Dal-Re, 2001).

Según las experiencias americanas se ha demostrado que una estabilización con cal tiene excelentes resultados, en lo siguiente:

- Materiales compuestos por mezclas de gravas y arcilla para su uso como capa granular superficial con una incorporación de 2% a 4% de cal en peso.
- Suelos altamente arcillosos para poder usarlos como una capa granular superficial (5 a 10 % de cal en peso) o como capa inferior (1 a 3% de cal en peso).

**Figura 2.25** Estabilización del suelo con cal



**Fuente:** Carlos Doroteo (2014)

#### **2.14.4 Aplicación de la cal hidratada (hidróxido de calcio)**

La cal hidratada debe ser uniformemente extendida en el porcentaje especificado desde camiones adecuadamente equipados. Un aplicador aprobado es preferible para la distribución uniforme. La cantidad de cal hidratada seca puede ser medida usando el mismo método que descrito encima para la cal viva.

La cal hidratada seca no debería ser extendida en condiciones de viento debido al polvo excesivo. En condiciones de viento, en áreas pobladas, o en zonas adyacentes al tráfico de vehículos pesados, la aplicación de lechada o una aplicación adecuada de cal viva pueden reducir al mínimo los problemas relacionados con el polvo.

Equipo para aplicación de cal hidratada seca: Para envíos en camión, los camiones con tanques auto descargables son los más eficientes para transportar y esparcir la cal porque no se requiere ningún manejo adicional. La descarga se realiza neumáticamente o por uno o varios transportadores de tomillo. La extensión puede ser lograda por una paleta mecánica colocada en la parte posterior u otros dispositivos.

Si se utiliza transporte de palangana, los mismos deben ser cubiertos para prevenir el polvo durante el viaje al lugar de aplicación y durante la extensión de la cal. La extensión, al utilizar transporte de palangana, deberá realizarse ajustándole un esparcidor mecánico en la parte posterior. No se recomienda descargar la cal en solo "volcán" para realizar posteriormente la extensión con motoniveladora. (Lime, 2006).

#### **2.14.5 Propiedades de los suelos estabilizados con cal**

- **Plasticidad:** El efecto en el suelo debido a la cal es que cambia el estado de plasticidad. Habrá incremento en el límite plástico como el límite líquido con suelos que presenten baja plasticidad y sutilmente su índice plástico; pero habrá disminución de índice plástico en suelos de plasticidad moderada y alta.
- **Capacidad de soporte:** El soporte en suelos arcillosos mayormente es bajo. Cuando el suelo este estabilizado con cal los resultados serían de mayor frecuencia a diferencia de varios suelos naturales elegidos.
- **Estabilidad volumétrica:** Los suelos pueden presentar hinchamientos riesgosos como valores, existiendo un posible peligro de desplazamientos de la capa cuando la

infraestructura este construida. Al adherir la cal esto puede reducir e implicar la eliminación de hinchamientos debido a la minoración de flexibilidad.

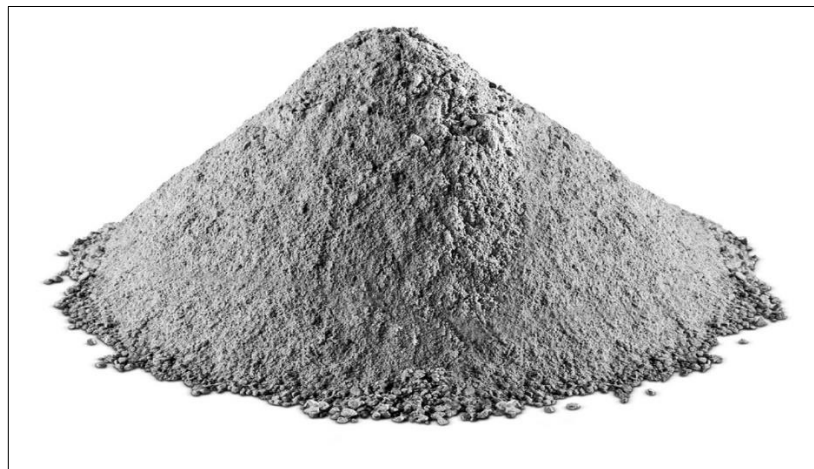
- **Permeabilidad:** Esta propiedad presenta distintas etapas en los suelos tratados con cal. De manera rápida, debido a la combinación, durante el desarrollo de transformación, el suelo cambia su composición de ser un suelo arcilloso cambia para a ser un suelo arenoso debido a un incremento de absorción.

Por otro lado, habiendo pasado un cierto plazo, en el orden en que se evolucionen las reacciones que tienen con el hidróxido de calcio y se compongan las vinculaciones entre partes del suelo, se ira obstruyendo, retornando a bajar el nivel de absorción hasta su estado inicial, o pudiendo ser más bajas. Por esto, el suelo comprometido con cal produce por último el mismo de impenetrable o mejor que el inicial.

#### 2.14.6 Cemento

El cemento es conocido por nombre de Cemento Portland o Cemento Hidráulico, lo que indica que es la mezcla de caliza y arcilla pulverizada en altas temperaturas, cuenta con una aplicación de yeso que a la hora de hacer un contacto el agua, esta desenrolla la capacidad de juntar fragmentos de grava y arena, para así formar un sólido o piedra artificial, la cual conocemos como concreto hidráulico.

**Figura 2.26** Muestra de cemento



**Fuente:** Alexander Levchenko (2018)

### **2.14.7 Estabilización del suelo con cemento**

La estabilización de suelos mediante la adición de cemento es un proceso en el cual normalmente se produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, los granos se pegan entre sí produciendo un incremento en su resistencia.

Los efectos generados a largo plazo en el suelo, resultan del fraguado y del endurecimiento del conglomerante. La adición de cemento Portland ayuda a generar en el suelo una resistencia mecánica, esta puede variar ampliamente y es función principalmente del tipo de cemento que se aplique y su dosificación.

Según Braja M. Das (2016), El cemento puede ser utilizado para estabilizar suelos arenosos y arcillosos. Al igual que en el caso de la cal, el cemento ayuda a disminuir el límite líquido y aumenta el índice de plasticidad y manejabilidad de los suelos arcillosos. La estabilización con cemento es eficaz para suelos arcillosos cuando el límite líquido es menor que 45 o 50 y el índice de plasticidad es menor de aproximadamente 25. Al igual que la cal, el cemento ayuda a aumentar la resistencia de los suelos y aumenta la fuerza con el tiempo de curado. Los suelos granulares y los suelos arcillosos con baja plasticidad son obviamente los más adecuados para la estabilización con cemento. Las arcillas cálcicas se estabilizan más fácilmente mediante la adición de cemento, en tanto que las arcillas sódicas e hidrogenadas, que son de naturaleza expansiva, responden mejor a la estabilización con cal.

La utilización del suelo cemento puede reemplazar bases y subbases, mejorar la subrasante. Este tipo de estabilización es mejor en suelos gruesos, ideales para suelos con 5 a 3,5% de finos. El cemento se adhiere y envuelve las partículas y la pasta los cementa en sus puntos de contacto. (Suarez Díaz, 2020).

Aquellos suelos apropiados que se pueden estabilizar utilizando el cemento son los granulares tipo A-1, A-2 y A-3, con la plasticidad baja o media ( $LL < 40$  y  $IP < 18$ ). Al integrar el cemento a un suelo, su IP disminuye, su límite de líquido varía, la densidad máxima, humedad óptima aumenta. (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2014).

**Tabla 2.9** Rango de cemento requerido en la estabilización de suelos

Clasificación de suelos AASHTO	Rango de cemento requerido del peso de los suelos (%)
A-1-a	3 - 5
A-1-b	5 - 8
A-2	5 - 9
A-3	7 - 11
A-4	7 - 12
A-5	8 - 13
A-6	9 - 15
A-7	10 - 16

**Fuente:** AASHTO (2011)

#### **2.14.8 Efectos de la incorporación del cemento**

IECA et al. (2012), indica que se puede distinguir entre efectos inmediatos y efectos a largo plazo, los cuales son:

##### **2.14.8.1 Mejora por modificación inmediata**

- **Modificaciones del estado hídrico:** Los efectos inmediatos se refieren principalmente al estado hídrico del suelo, que sufre un secado por el hecho de la adición de una cierta cantidad de materia seca y, en menor medida, de la pérdida de agua consumida en la hidratación del conglomerante. Este secado, según las dotaciones aplicadas, varía teóricamente, entre el 0,3 y el 0,5% del contenido de agua por punto porcentual de conglomerante, si bien en estos valores no se tiene en cuenta la evaporación que, al igual que con la cal, puede producirse en el transcurso de la mezcla in situ.
- **Modificación de las características de la fracción arcillosa del suelo:** En algunos países se emplean conglomerantes especiales para carreteras con un fuerte contenido de cal (viva o apagada), que pueden dar lugar a la floculación inmediata de las partículas arcillosas, al igual que ocurre con la cal (pero sin ser ni tan rápida, ni tan intensa). Para suelos finos y con plasticidad elevada, el tratamiento mixto, primero con cal y luego con cemento, es la solución más adecuada.

#### **2.14.8.2 Efectos a medio y largo plazo**

Los efectos a largo plazo de la incorporación del cemento son diferentes según se trate de suelos granulares o de suelos finos. En los primeros, la acción cementante es similar a la que se produce en el hormigón vibrado, con la diferencia de que el conglomerante no rellena completamente los huecos del esqueleto granular. En las arenas, la cementación se produce únicamente en los puntos de contacto entre granos. Cuanto más continua sea la granulometría, más reducidos serán los huecos entre partículas, más numerosas y de mayor tamaño las zonas de contacto entre ellas y más eficaz el efecto cementante. Por el contrario, las arenas monogranulares, como las de playa, requieren una dotación elevada de cemento para ser estabilizadas.

En los suelos finos (arcillosos y limosos con plasticidad no elevada), la hidratación del cemento crea unos enlaces resistentes entre las partículas, formando una matriz que envuelve a las mismas. Esta matriz tiene una estructura de panal de la cual depende la resistencia de la mezcla, puesto que las aglomeraciones de partículas dentro de las “celdas” tienen una resistencia muy reducida y contribuyen muy poco a la del conjunto. La matriz fija las partículas, de forma que ya no pueden deslizar las unas sobre las otras. Es decir, el cemento reduce la plasticidad y aumenta la resistencia a esfuerzos cortantes. El efecto químico de superficie del cemento reduce la afinidad por el agua y con ello la capacidad de retención de la misma de los suelos arcillosos. Debido a esta menor afinidad por el agua y a la resistencia de la matriz, los cambios de volumen (hinchamientos) provocados por la absorción de agua y los efectos de la congelación y el deshielo disminuyen notablemente.

La incorporación de cemento en cantidad suficiente a un suelo permite obtener un material con una resistencia mecánica apreciable a corto-medio plazo. La dotación mínima de conglomerante depende del tipo de suelo, siendo los más adecuados los de tipo granular con finos poco plásticos.

Conviene tener en cuenta que para que el suelo tratado desarrolle una resistencia mecánica apreciable a corta edad debe incorporarse al mismo un contenido mínimo de cemento que depende del tipo de suelo, y por debajo del cual solamente es razonable esperar que se



produzcan efectos de mejora de la capacidad de soporte y de disminución de la sensibilidad al agua.

En cualquier tipo de suelo, se obtiene el máximo partido del proceso cementante cuando la compactación se realiza adecuadamente, con un contenido de humedad que facilite tanto dicha operación como la hidratación del cemento.

#### **2.14.9 Efectos de la adición conjunta de cal y cemento**

Según IECA et al. (2012), en el caso de que los suelos a tratar con cemento presenten una humedad o una plasticidad excesivas, la corrección previa mediante un tratamiento con una dosis moderada de cal permite optimizar la acción del cemento sobre dichos suelos. Este proceso se denomina estabilización mixta.

En el caso de suelos, sean del tipo que sean, con exceso de humedad natural, la adición previa de un porcentaje reducido de cal permite disminuir la misma hasta los valores aconsejables para su posterior tratamiento con cemento, debido a los efectos antes señalados.

con el objeto de aprovechar al máximo la acción previa de la cal, la mezcla deberá realizarse en dos etapas. En una primera, se mezclará el suelo con la cal, mientras que el cemento no deberá incorporarse hasta que hayan transcurrido algunas horas.

Una vez realizado el pretratamiento con cal, los efectos del cemento son similares a los que se obtienen cuando se mezcla el mismo con suelos con poco finos.

**CAPÍTULO III**  
**RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN**

## **CAPÍTULO III**

### **RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN**

#### **3.1 Criterios metodológicos**

##### **3.1.1 Métodos**

Nuestra investigación se presenta de la siguiente manera:

Como Experimentación Científica, ya que se realizarán ensayos de caracterización en el laboratorio de mecánica de suelos sobre el comportamiento del hidróxido de calcio y cemento en suelos arcillosos de la comunidad de Cañon Oculto.

##### **3.1.2 Técnicas**

La técnica de recolección de datos será por el medio de la observación científica directa, esta técnica consiste en observar atentamente el fenómeno o hecho con un objetivo claro, definido y preciso, recolectar la información y registrarla para su previo análisis.

##### **3.1.3 Unidad de estudio**

Es la estabilización de suelos arcillosos de la comunidad de Cañon Oculto mediante la adición de hidróxido de calcio y cemento.

##### **3.1.4 Población**

En esta investigación la población estará constituida por todos los suelos arcillosos situados en el departamento de Tarija.

##### **3.1.5 Muestra**

Los suelos arcillosos que se encuentren en la comunidad de Cañon Oculto constituyen la muestra en el presente estudio.

##### **3.1.6 Selección de la técnica de muestreo**

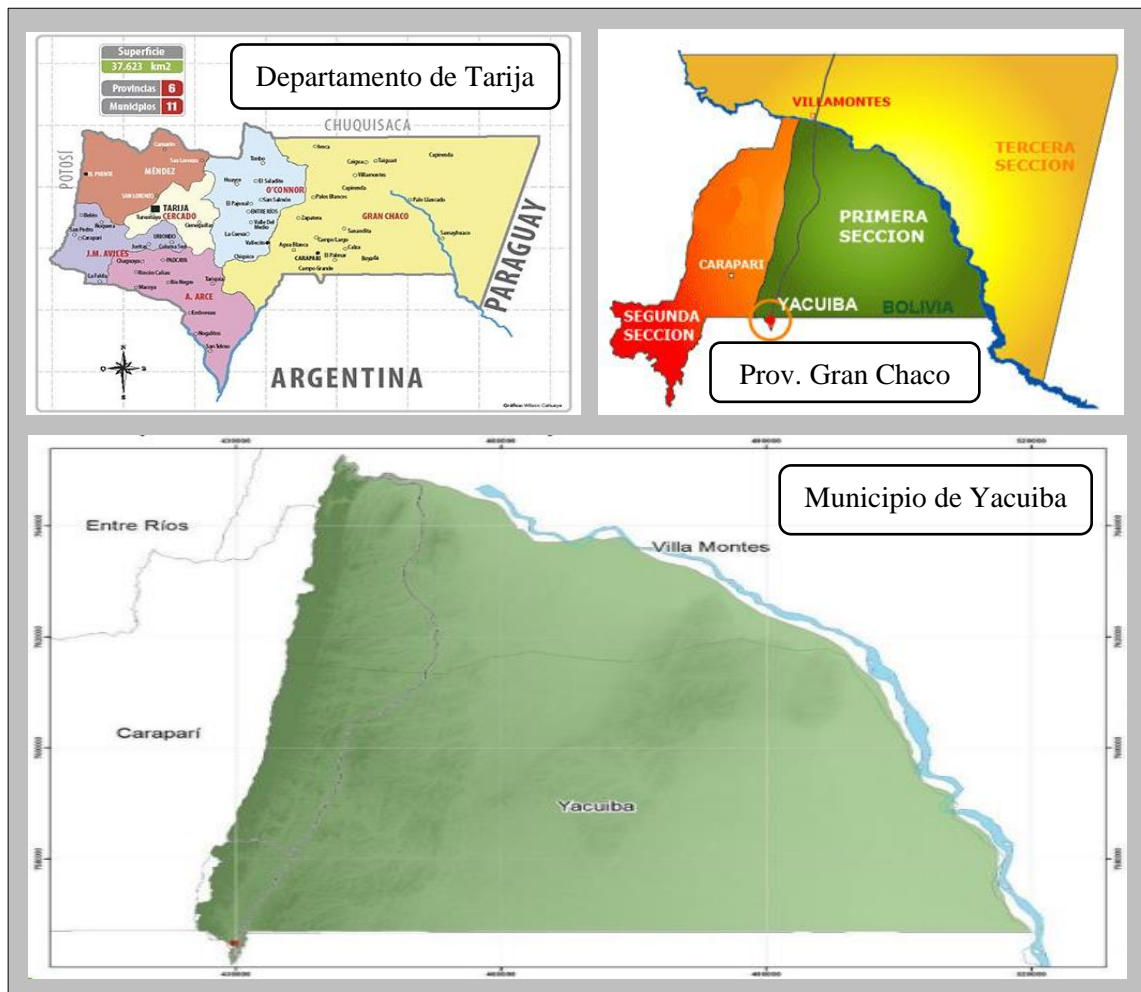
El muestreo para la presente investigación es de carácter no probabilístico, porque en la investigación realizada se determina el número de ensayos necesarios para cumplir con el objetivo de la investigación.

### 3.2 Ubicación del proyecto

La ubicación de la presente investigación, se encuentra en el departamento de Tarija, Provincia Gran Chaco, municipio de Yacuiba, comunidad de Cañon Oculto.

Yacuiba es una ciudad y municipio de Bolivia ubicada en el Departamento de Tarija, en la frontera sur del país. Es la capital de la Provincia Gran Chaco y la ciudad más grande y poblada del Chaco Boreal.

**Figura 3.1** Ubicación geográfica del proyecto



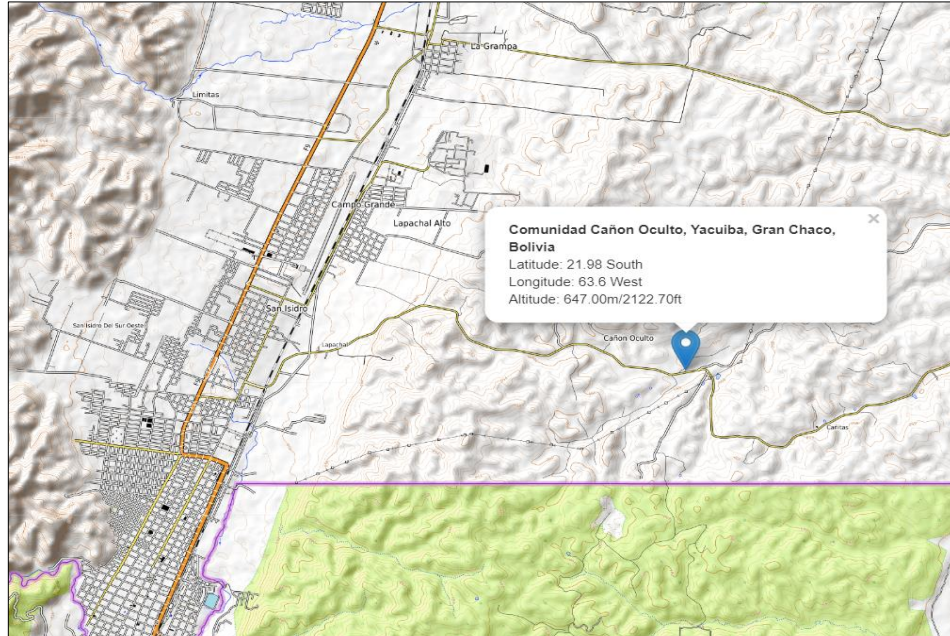
**Fuente:** Elaboración propia

#### 3.2.1 Características de la zona de estudio

El área de investigación se encuentra ubicado en el municipio de Yacuiba, más específicamente en la comunidad de Cañon Oculto.

La comunidad de Cañon Oculto tiene alrededor de 382 habitantes. Se encuentra ubicado a 8 km del municipio de Yacuiba, cerca de la comunidad Cañitas y Lapachal Alto.

**Figura 3.2** Ubicación de la comunidad Cañon Oculto.



**Fuente:** Mapcarta (2022)

### 3.2.2 Ubicación de la muestra

Se ubicaron 3 zonas para proceder a extraer muestras de suelos arcillosos, estas zonas están aproximadamente a unos 4, 7 y 10 minutos del centro de la comunidad.

**Tabla 3.1** Coordenadas de los puntos de extracción de muestras

Coordenadas UTM			
Muestras	Zona	Coordenadas este	Coordenadas norte
M-01	20 K	438917,00 m E	7568181,00 m S
M-02	20 K	434251,00 m E	7570102,00 m S
M-03	20 K	433703,00 m E	7569878,00 m S

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.3** Ubicación de los puntos de extracción de muestras



**Fuente:** Google Earth

### **3.3 Justificación de la zona de estudio**

El motivo de elección de la zona de estudio para el presente proyecto, radica en que la comunidad presenta suelos arcillosos vírgenes que no fueron productos de alguna estabilización. Además, la comunidad cuenta con tres bancos de material arcilloso. Estos suelos arcillosos son ideales para la aplicación de procesos de estabilización, ya que las arcillas son, probablemente, el material más problemático en ingeniería civil y geotecnia, es por eso, que su estudio en mecánica de suelos y geotecnia es necesario para lograr que las obras de ingeniería civil no sufran daños con el pasar del tiempo. La disponibilidad de estos bancos ofrece una oportunidad para investigar y desarrollar soluciones que puedan aprovechar al máximo estos recursos locales. La utilización de estos bancos en la

investigación busca no solo comprender su comportamiento cuando se estabilizan con hidróxido de calcio y cemento, sino también promover la consideración de estos suelos estabilizados en futuros proyectos viales como una alternativa viable y sostenible

### 3.4 Extracción de la muestra de suelo

La forma de obtener muestras de suelos puede ser, tomadas superficialmente o de una profundidad, la cual se realiza mediante una excavación a cielo abierto o de un banco de préstamo.

Para identificar las muestras de suelos arcillosos, se toma un espécimen de 10 cm<sup>3</sup>, se lo mezcla con agua y se procede a moldear hasta alcanzar una consistencia de masilla, se rola la muestra sobre una superficie lisa, hasta formar un rollito de 3 mm, cuando se rola el suelo y al ser presionado el rollito no se quiebra ante una presión fuerte del dedo, se identifica como suelos finos, específicamente suelos arcillosos.

Una vez identificado el suelo arcilloso, se procedió a extraer las muestras con ayuda de pala y picota. Las muestras son colocadas en bolsas para evitar pérdidas de humedad, posteriormente fueron transportadas a la ciudad de Tarija, al laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

**Figura 3.4** Letrero de acceso a la comunidad Cañon Oculto



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.5** Extracción de la Muestra N°1



**Fuente:** Elaboración propia

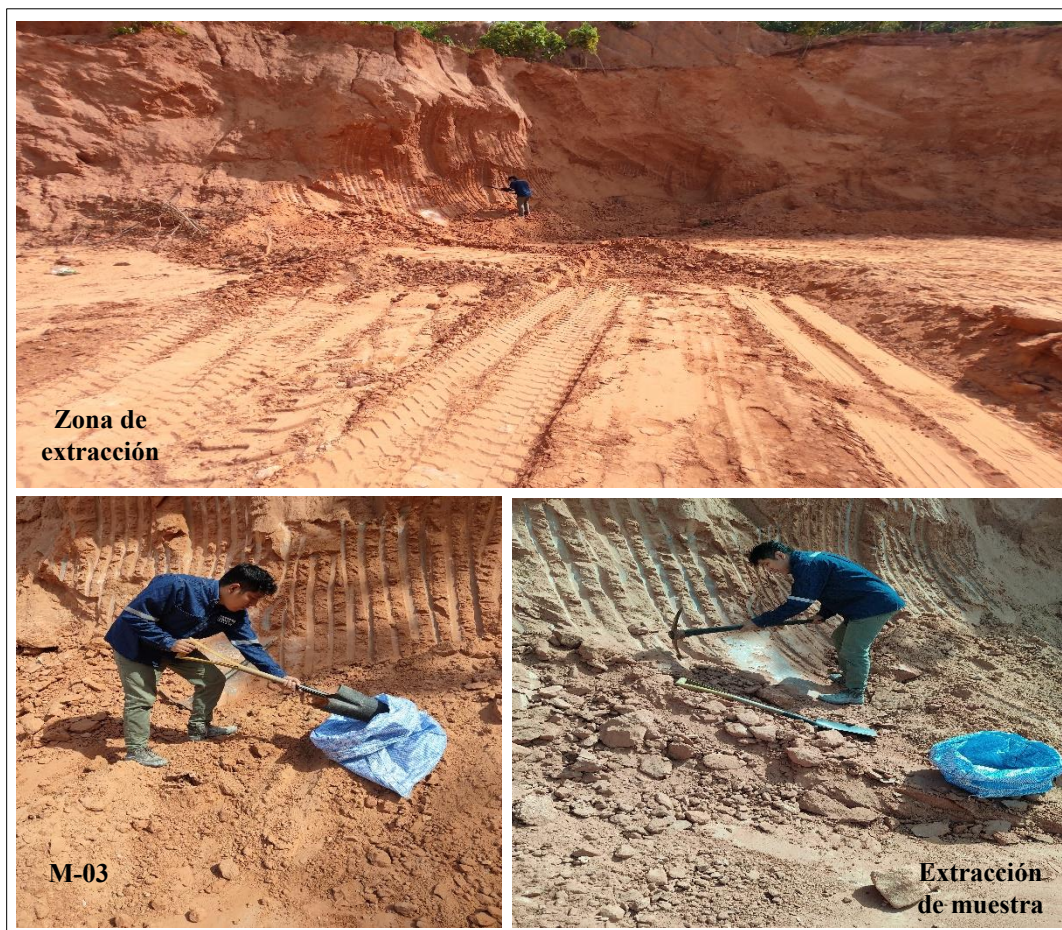
**Figura 3.6** Extracción de la Muestra N°2



**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3.7** Extracción de la Muestra N°3



**Fuente:** Elaboración propia

### **3.5 Caracterización de los materiales estabilizantes**

#### **3.5.1 Hidróxido de calcio (cal hidratada)**

La venta de hidróxido de calcio en la ciudad de Tarija, se lo realiza al por mayor comúnmente a granel y en volumen, mientras que la venta en cantidades menores se lo realiza en bolsas de papel (de cemento) o polietileno (de harina).

En conclusión, la venta de hidróxido de calcio en Tarija actualmente no se encuentra estandarizado, debido a que su venta se realiza sin supervisión, además que el proceso de producción en la mayoría de los casos utiliza técnicas artesanales rústicas con calcinación al aire y apagado por aspersión, afectando sin duda en la calidad del producto.

El hidróxido de calcio utilizado en esta investigación proviene de la marca "La Calera". Este producto cuenta con un proceso de fabricación industrial y una calidad superior.

**Tabla 3.2** Composición química del hidróxido de calcio (La Calera)

Descripción	Hidróxido de calcio (La Calera)
CaO	70,46%
MgO	3,27%
SiO <sub>2</sub>	1,63%
Otros	24,64%
Total	100%

**Fuente:** Elaboración propia

Para una comprensión más completa del hidróxido de calcio utilizado en esta investigación, en la Tabla 3.2 se aprecia su composición química.

**Tabla 3.3** Granulometría para el hidróxido de calcio (La Calera)

Tamiz N°	% Que Pasa La Calera	Especificaciones según la ABC	
N° 40	100	100	Cumple
N° 200	81,10	65 - 100	Cumple

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5.2 Cemento

Los cementos más adecuados para estabilizar suelos son los que tienen una mejor trabajabilidad, un moderado calor de hidratación para limitar los efectos de la fisuración por retracción.

Los cementos que más se aproximan a las cualidades anteriores son aquellos con mayor contenido de adiciones activas (puzolanas) En general, se debe procurar emplear cementos de clase resistente media o baja, dejando los de clase superior para situaciones especiales, como puede ser una puesta en obra en tiempo frío. Por lo que el cemento idóneo para el presente proyecto es Cemento El Puente IP-30.

### 3.6 Caracterización de suelos

#### 3.6.1 Análisis granulométrico (ASTM D422; AASHTO T88)

La granulometría de los suelos, no es más que el fraccionamiento de una muestra de suelo en varias partes considerando el tamaño de las partículas del suelo.

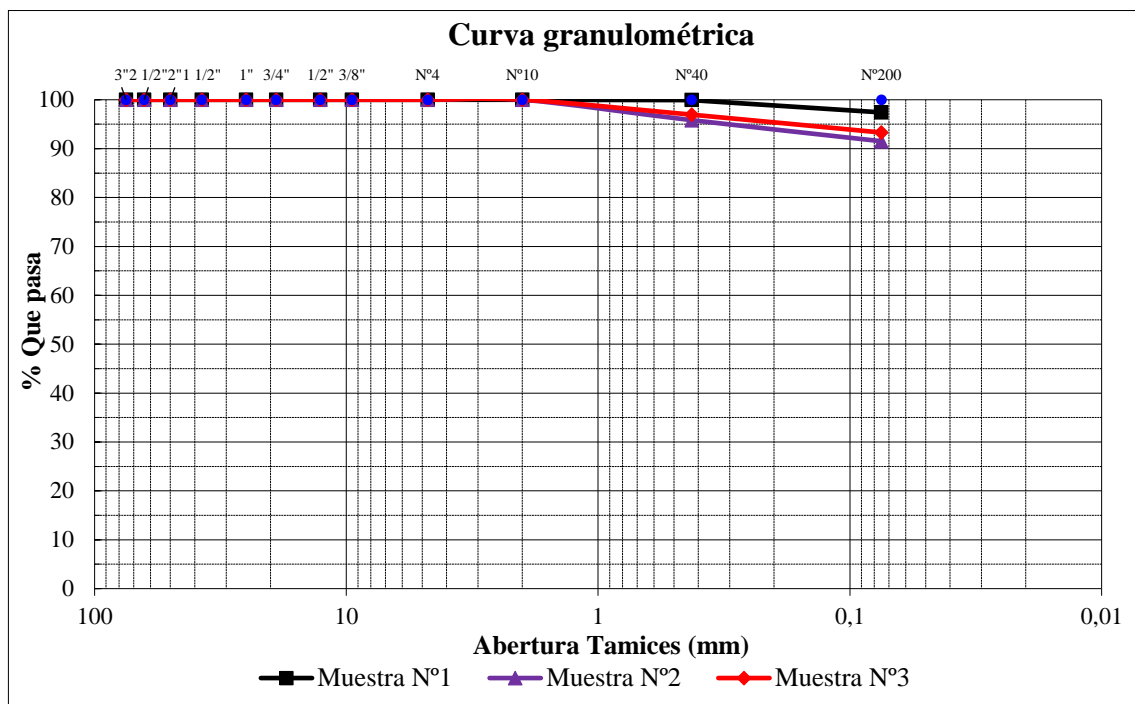
El ensayo comienza pesando entre 300-500 gramos de muestra que pase el tamiz N°10, la muestra se deja reposar en agua durante 24 horas para que se sature completamente. Pasado este tiempo se introduce el material en el tamiz N°200 y se realiza el lavado del suelo hasta que el agua pasante tome aspectos más claros sin sedimentación. El material retenido en el tamiz N°200 se lo hace secar en el horno, y luego se procede a tamizar por el tamiz N°40 y N°200 registrando los pesos retenidos.

**Figura 3.8** Proceso del ensayo análisis granulométrico



**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 3.1** Curva granulométrica de la muestra M-01, M-02 y M-03



**Fuente:** Elaboración propia

**Resumen de resultados**

**Tabla 3.4** Resumen de resultados del análisis granulométrico

Comunidad Cañon Oculto			
Tamices	% Que pasa del total		
	M-01	M-02	M-03
3"	100,00	100,00	100,00
2 1/2"	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00
N°4	100,00	100,00	100,00
N° 10	100,00	100,00	100,00
N° 40	99,93	95,83	96,95
N° 200	97,41	91,52	93,29

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6.2 Límites de Atterberg

#### 3.6.2.1 Límite líquido (ASTM D4318; AASHTO T89)

Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado en que una mezcla de suelo y agua, capaz de ser moldeada, se deposita en la cuchara de Casagrande, y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que el surco que previamente se ha hecho en la muestra se cierre en una longitud de 12,7 mm Si el número de golpes para que se cierre el surco es 25, la humedad del suelo corresponde al límite líquido.

**Figura 3.9** Proceso del límite líquido



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6.2.2 Límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318; AASHTO T90)

El límite plástico se define como la humedad más baja con la que pueden formarse con un suelo cilindros de 3 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros presenten grietas.

**Figura 3.10** Proceso del límite plástico



**Fuente:** Elaboración propia

## Resumen de resultados

**Tabla 3.5** Resumen de resultados del ensayo límites de Atterberg

Comunidad Cañon Oculito			
Descripción	M-01	M-02	M-03
Límite líquido (%)	45	41	42
Límite plástico (%)	25	25	24
Índice de plasticidad (%)	20	16	18

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6.3 Contenido de humedad (ASTM D2216)

El contenido de humedad de una masa de suelo, está formado por la suma de sus aguas libre, capilar e higroscópica.

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio, consiste en tomar una muestra de suelo, pesarla antes y después de su desecado y calcular su contenido de humedad.

**Figura 3.11** Proceso del ensayo contenido de humedad



**Fuente:** Elaboración propia

## Resumen de resultados

**Tabla 3.6** Resumen de resultados del contenido de humedad

Comunidad Cañon Oculito			
Descripción	M-01	M-02	M-03
Contenido de humedad (%)	13	8	9

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6.4 Clasificación del suelo

La clasificación de los suelos se basa en los resultados de las pruebas físicas, mecánicas u otra información independiente al origen y tamaño de las partículas. La granulometría y la consistencia de los suelos son estudios que se utilizan para clasificar suelos.

El propósito de cualquier clasificación es ser capaz de organizar el conocimiento de tal modo de que las propiedades de los suelos puedan ser recordados y sus relaciones entendidas más fácilmente para un objetivo específico. Existen dos sistemas de clasificación de suelos:

- AASHTO
- SUCS

## Resumen de resultados

**Tabla 3.7** Resumen de resultados de la clasificación del suelo

Comunidad Cañon Oculito		
Muestra	Clasificación	Descripción
M-01	SUCS: CL AASHTO: A-7-6(13)	Arcilla Inorgánica de mediana plasticidad, presenta un color rojo, además de cambios de volumen entre sus estados seco y húmedo.
M-02	SUCS: CL AASHTO: A-7-6(11)	
M-03	SUCS: CL AASHTO: A-7-6(12)	

**Fuente:** Elaboración propia



### 3.6.5 Compactación (AASHTO T180; ASTM D1557)

La compactación consiste en un proceso repetitivo, cuyo objetivo es conseguir una densidad específica para una relación óptima de agua, al fin de garantizar las características mecánicas necesarias del suelo.

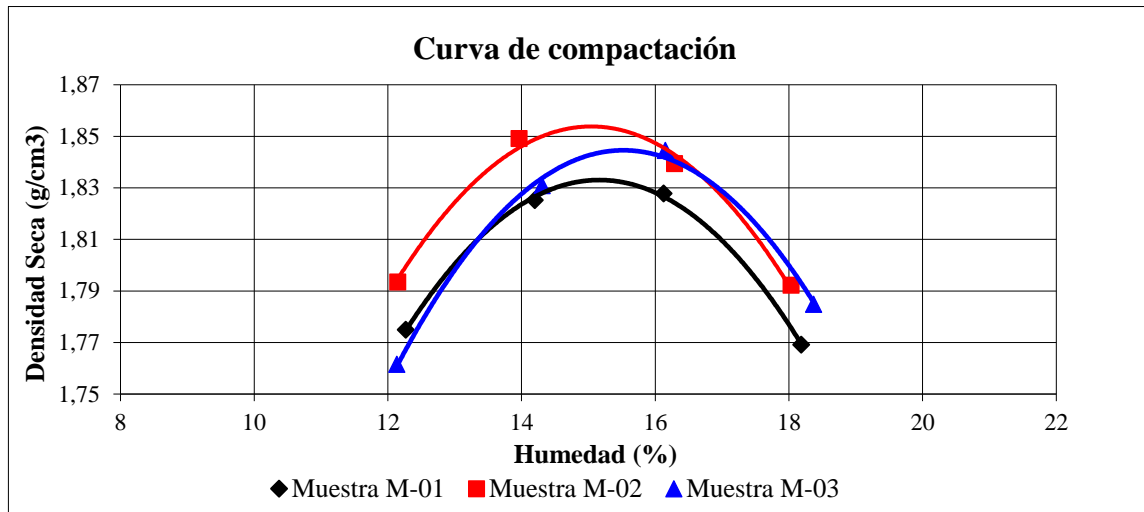
El ensayo consiste en modificar la humedad del suelo por medio de adición de agua y finalmente, se le transmite energía de compactación por el medio de golpes. Las determinaciones de los puntos sencillos se efectúan compactando el suelo dentro de un molde de un tamaño dado, con un martillo de 4,5 kg (10 lb) que se deja caer desde una altura de 457,2 mm (18"). Para arcillas puras se puede incrementar humedades a partir de 12%, 14%, 16%, 18%, 20% y 22%.

**Figura 3.12** Proceso del ensayo compactación



**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 3.2** Curvas de compactación de la muestra M-01, M-02 y M-03



**Fuente:** Elaboración propia

### Resumen de resultados

**Tabla 3.8** Resumen de resultados de la compactación de suelos

Comunidad Cañon Oculto			
Descripción	M-01	M-02	M-03
Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,83	1,85	1,84
Humedad óptima (%)	15,16	15,04	15,52

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6.6 Relación de soporte de california CBR (ASTM D1883; AASHTO T193)

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

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

El ensayo CBR de suelos consiste básicamente en compactar muestras de suelos en tres moldes normalizados a 12, 25 y 56 golpes en 5 capas, dichos moldes son sumergirlos en agua y sometidos en una prensa CBR.

**Figura 3.13** Proceso del ensayo CBR



**Fuente:** Elaboración propia

**Resumen de resultados**

**Tabla 3.9** Resumen de resultados del ensayo CBR

Comunidad Cañon Oculito		
Descripción	CBR al 95 (%)	Expansión (%)
M-01	2	3,53
M-02	3	3,37
M-03	2	3,46

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7 Estabilización suelo - hidróxido de calcio

#### 3.7.1 Dosificación del hidróxido de calcio

Para determinar la dosificación del hidróxido de calcio, hemos seguido las recomendaciones establecidas en el manual de carreteras ABC. Según este manual, para la estabilización de un suelo destinado a ser empleado como subrasante utilizando hidróxido de calcio, la dosificación recomendada oscila entre 3 - 7% respecto al peso del suelo. Para la presente investigación se han evaluado porcentajes de 3%, 5% y 7%.

#### 3.7.2 Límites de Atterberg

**Figura 3.14** Proceso del ensayo límites de Atterberg aplicando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$



**Fuente:** Elaboración propia

## Resumen de resultados

**Tabla 3.10** Resumen de resultados de límites de Atterberg con  $\text{Ca(OH)}_2$

Comunidad Cañon Oculito M-01			
Descripción	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
Suelo natural	45	25	20
3% $\text{Ca(OH)}_2$	41	28	13
5% $\text{Ca(OH)}_2$	38	30	8
7% $\text{Ca(OH)}_2$	37	31	6

**Fuente:** Elaboración propia

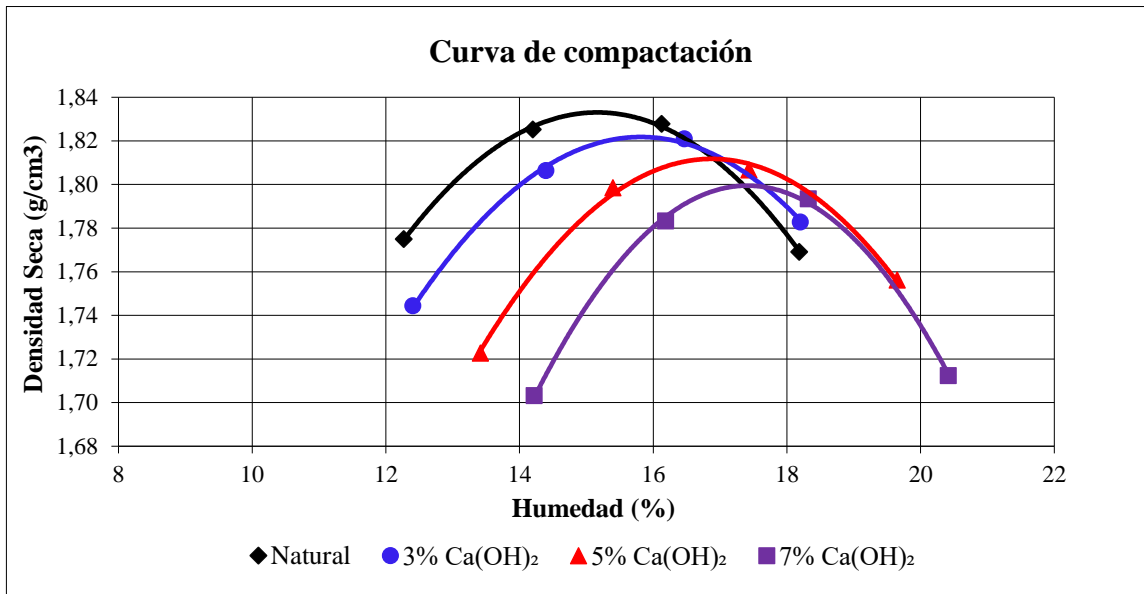
### 3.7.3 Compactación

**Figura 3.15** Proceso del ensayo compactación aplicando  $\text{Ca(OH)}_2$



**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 3.3** Curvas de compactación con 3%, 5% y 7% de Ca(OH)<sub>2</sub>



**Fuente:** Elaboración propia

### Resumen de resultados

**Tabla 3.11** Resumen de resultados de compactación con Ca(OH)<sub>2</sub>

Comunidad Cañon Oculto M-01		
Descripción	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )
Suelo natural	15,16	1,83
3% Ca(OH) <sub>2</sub>	15,82	1,82
5% Ca(OH) <sub>2</sub>	16,87	1,81
7% Ca(OH) <sub>2</sub>	17,41	1,80

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7.4 Relación de soporte de california CBR

Figura 3.16 Proceso del ensayo CBR aplicando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Fuente: Elaboración propia

### Resumen de resultados

Tabla 3.12 Resumen de resultados de CBR con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Comunidad Cañon Oculito M-01		
Descripción	CBR al 95 (%)	Expansión (%)
Suelo natural	2	3,53
3% $\text{Ca}(\text{OH})_2$	6	1,46
5% $\text{Ca}(\text{OH})_2$	10	0,89
7% $\text{Ca}(\text{OH})_2$	12	0,56

Fuente: Elaboración propia

### 3.8 Estabilización suelo - cemento

#### 3.8.1 Dosificación del cemento

Para la dosificación del cemento nos hemos basado en la norma AASHTO, dicha norma nos indica que la dosificación para un suelo A-7 es de 10 - 16%. Por lo tanto, para el presente proyecto hemos tomado los porcentajes de 10%, 13% y 16% con respecto al peso del suelo.

#### 3.8.2 Límites de Atterberg

**Figura 3.17** Proceso del ensayo límites de Atterberg aplicando cemento



**Fuente:** Elaboración propia



## Resumen de resultados

**Tabla 3.13** Resumen de resultados de límites de Atterberg con cemento

Comunidad Cañon Oculto M-01			
Descripción	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
Suelo natural	45	25	20
10% cemento	43	27	16
13% cemento	40	27	13
16% cemento	38	29	9

**Fuente:** Elaboración propia

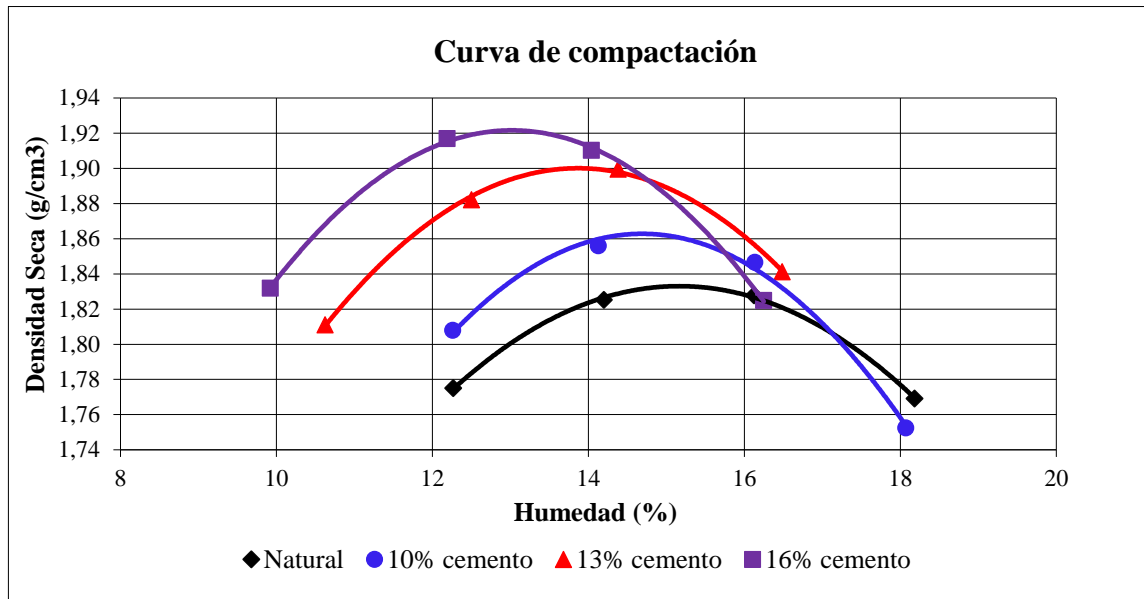
### 3.8.3 Compactación

**Figura 3.18** Proceso del ensayo compactación aplicando cemento



**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 3.4** Curvas de compactación con 10%, 13% y 16% de cemento



**Fuente:** Elaboración propia

### Resumen de resultados

**Tabla 3.14** Resumen de resultados de compactación con cemento

Comunidad Cañon Oculito M-01		
Descripción	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )
Suelo natural	15,16	1,83
10% cemento	14,69	1,86
13% cemento	13,86	1,90
16% cemento	13,02	1,92

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8.4 Relación de soporte de california CBR

Figura 3.19 Proceso del ensayo CBR aplicando cemento



Fuente: Elaboración propia

### Resumen de resultados

Tabla 3.15 Resumen de resultados de CBR con cemento

Comunidad Cañon Oculto M-01		
Descripción	CBR al 95 (%)	Expansión (%)
Suelo natural	2	3,53
10% cemento	19	1,97
13% cemento	20	1,61
16% cemento	28	1,02

Fuente: Elaboración propia

### **3.9 Estabilización suelo - hidróxido de calcio - cemento**

#### **3.9.1 Dosificación del hidróxido de calcio - cemento**

No se ha estipulado una normativa específica con respecto a la dosificación de estabilización mixta. La selección de la dosificación dependerá de los objetivos que se deseen lograr mediante el proceso de estabilización. En el ámbito de esta investigación, el propósito es mejorar la calidad del suelo arcilloso con el fin de emplearlo como subrasante mejorada. Para garantizar resultados óptimos y evitar posibles efectos adversos, se sugiere adoptar una dosificación con porcentajes mínimos, debido a que una sobre dosificación con altos porcentajes de aditivos puede generar reacciones químicas indeseables o una respuesta impredecible del suelo, además de generar costos significativos relacionados con la cantidad excesiva de aditivos empleados.

Por ende, basándose en las recomendaciones antes mencionadas, se propone una estrategia de estabilización mixta utilizando porcentajes de 5% y 7%. Esto involucra una combinación de 3% de hidróxido de calcio - 2% de cemento, y viceversa (2% hidróxido de calcio - 3% cemento), así mismo la dosificación mixta al 7%, compuesta por 3% de hidróxido de calcio - 4% de cemento, junto con 4% de hidróxido de calcio - 3% de cemento.

**3.9.2 Límites de Atterberg**

**Figura 3.20** Proceso del ensayo límites de Atterberg con  $\text{Ca(OH)}_2$  y cemento



**Fuente:** Elaboración propia

## Resumen de resultados

**Tabla 3.16** Resumen de resultados de límites de Atterberg, aplicando la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento para la muestra M-01

Comunidad Cañon Oculto M-01			
Descripción	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
Suelo natural	45	25	20
2% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	41	31	10
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 2% cemento	40	31	9
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 4% cemento	40	32	8
4% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	39	31	8

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.17** Resumen de resultados de límites de Atterberg, aplicando la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento para la muestra M-02

Comunidad Cañon Oculto M-02			
Descripción	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
Suelo natural	41	25	16
2% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	38	29	9
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 2% cemento	37	30	7
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 4% cemento	37	31	6
4% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	35	0	N.P.

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.18** Resumen de resultados de límites de Atterberg, aplicando la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento para la muestra M-03

Comunidad Cañon Oculito M-03			
Descripción	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
Suelo natural	42	24	18
2% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	40	30	10
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 2% cemento	39	31	8
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 4% cemento	38	32	6
4% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	37	0	N.P.

**Fuente:** Elaboración propia

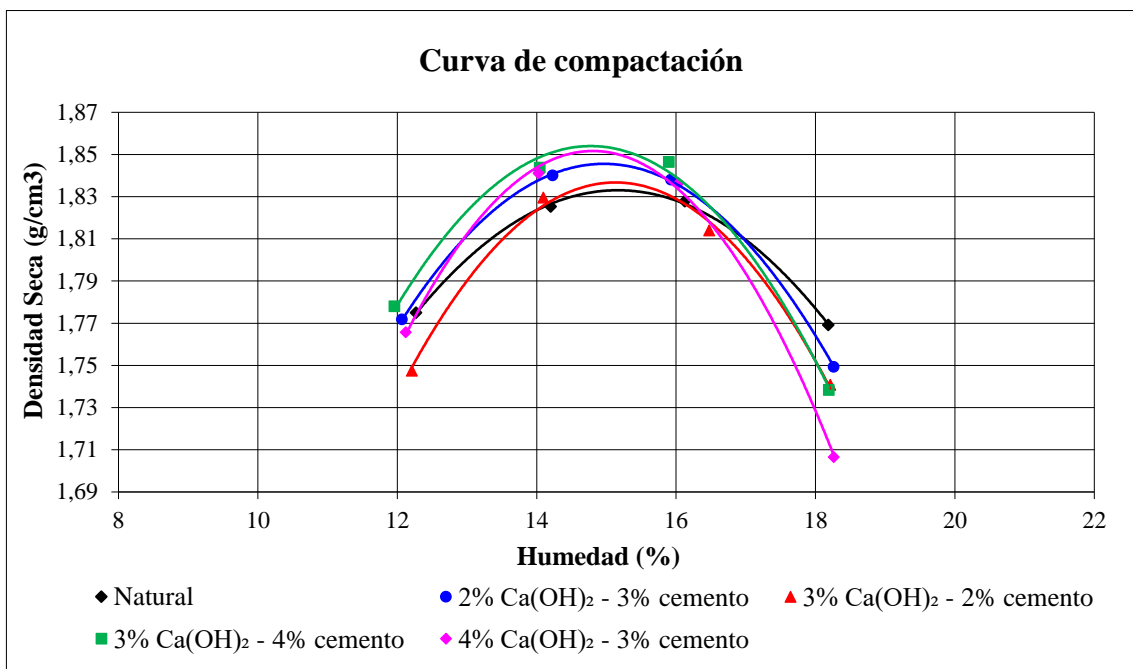
### 3.9.3 Compactación

**Figura 3.21** Proceso del ensayo compactación con  $\text{Ca(OH)}_2$  y cemento



**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 3.5** Curvas de compactación aplicando  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento, muestra M-01



**Fuente:** Elaboración propia

### Resumen de resultados

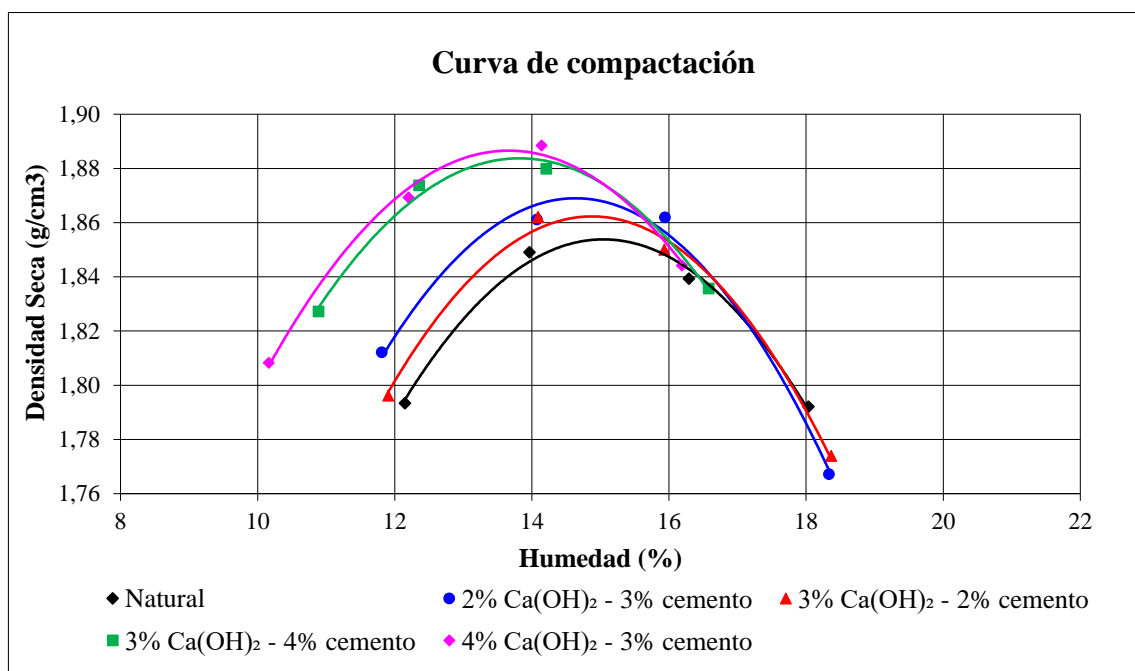
**Tabla 3.19** Resumen de resultados de compactación, aplicando la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento para la muestra M-01

Comunidad Cañon Oculito M-01		
Descripción	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )
Suelo natural	15,16	1,83
2% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	14,96	1,85
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 2% cemento	15,14	1,84
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 4% cemento	14,78	1,86
4% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	14,81	1,85

**Fuente:** Elaboración propia



**Gráfico 3.6** Curvas de compactación aplicando  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento, muestra M-02



**Fuente:** Elaboración propia

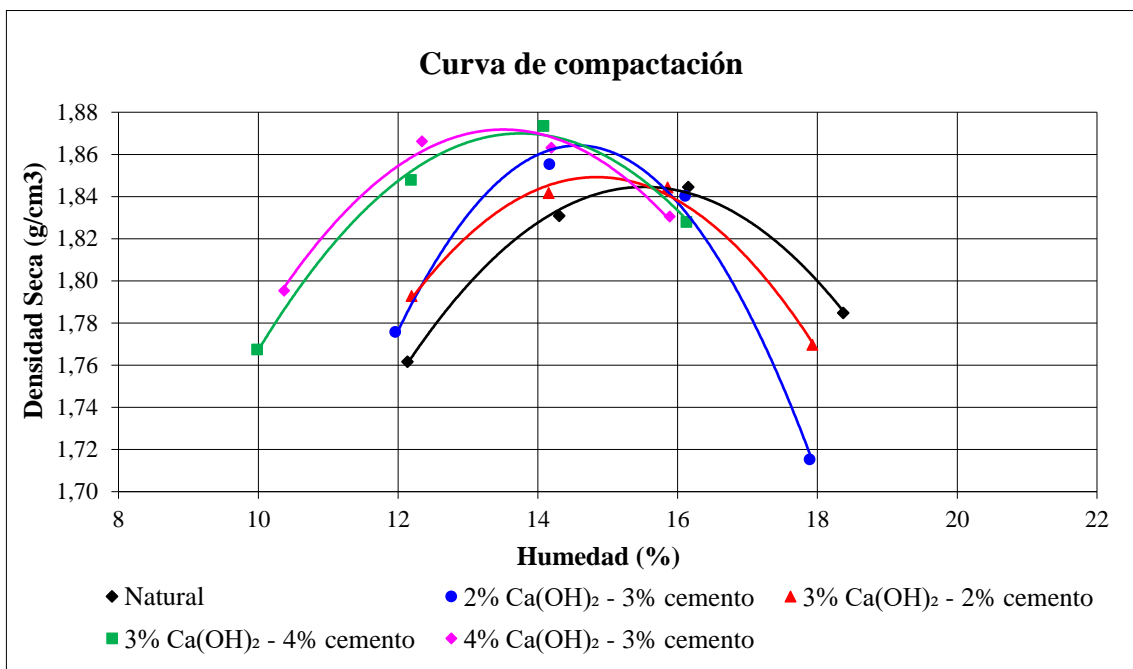
### Resumen de resultados

**Tabla 3.20** Resumen de resultados de compactación, aplicando la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento para la muestra M-02

Comunidad Cañon Oculito M-02		
Descripción	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (g/cm³)
Suelo natural	15,04	1,85
2% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	14,64	1,87
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 2% cemento	14,87	1,86
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 4% cemento	13,81	1,88
4% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	13,67	1,89

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 3.7** Curvas de compactación aplicando  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento, muestra M-03



**Fuente:** Elaboración propia

### Resumen de resultados

**Tabla 3.21** Resumen de resultados de compactación, aplicando la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento para la muestra M-03

Comunidad Cañon Oculito M-03		
Descripción	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )
Suelo natural	15,52	1,84
2% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	14,57	1,86
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 2% cemento	14,83	1,85
3% $\text{Ca(OH)}_2$ - 4% cemento	13,75	1,87
4% $\text{Ca(OH)}_2$ - 3% cemento	13,51	1,87

**Fuente:** Elaboración propia

**3.9.4 Relación de soporte de california CBR**

**Figura 3.22** Proceso del ensayo CBR con  $\text{Ca(OH)}_2$  y cemento



**Fuente:** Elaboración propia

## Resumen de resultados

**Tabla 3.22** Resumen de resultados de CBR, aplicando la mezcla suelo -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - cemento para la muestra M-01

Comunidad Cañon Oculito M-01		
Descripción	CBR al 95 (%)	Expansión (%)
Suelo natural	2	3,53
2% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 3% cemento	14	1,44
3% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 2% cemento	12	1,09
3% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 4% cemento	16	0,76
4% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 3% cemento	15	0,58

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.23** Resumen de resultados de CBR, aplicando la mezcla suelo -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - cemento para la muestra M-02

Comunidad Cañon Oculito M-02		
Descripción	CBR al 95 (%)	Expansión (%)
Suelo natural	3	3,37
2% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 3% cemento	16	1,11
3% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 2% cemento	15	0,76
3% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 4% cemento	20	0,75
4% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - 3% cemento	19	0,43

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.24** Resumen de resultados de CBR, aplicando la mezcla suelo - Ca(OH)<sub>2</sub> - cemento para la muestra M-03

Comunidad Cañon Oculito M-03		
Descripción	CBR al 95 (%)	Expansión (%)
Suelo natural	2	3,46
2% Ca(OH) <sub>2</sub> - 3% cemento	15	1,28
3% Ca(OH) <sub>2</sub> - 2% cemento	13	0,86
3% Ca(OH) <sub>2</sub> - 4% cemento	17	0,81
4% Ca(OH) <sub>2</sub> - 3% cemento	17	0,48

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.10 Aplicación práctica

#### 3.10.1 Justificación de la zona de aplicación

Dado que se extrajeron muestras de suelos arcillosos de la comunidad de Cañon Oculito, se procedió a desarrollar un diseño de la estructura de pavimento utilizando la muestra de suelo estabilizado con la dosificación óptima. Este diseño se ejecutó en una ubicación estratégica que aportara beneficios a la comunidad. Como parte de esta elección, se optó por un área muy transitada por los habitantes, que incluye la posición de la casa comunal y la iglesia de la comunidad.

#### 3.10.2 Determinación de los espesores por capa del pavimento

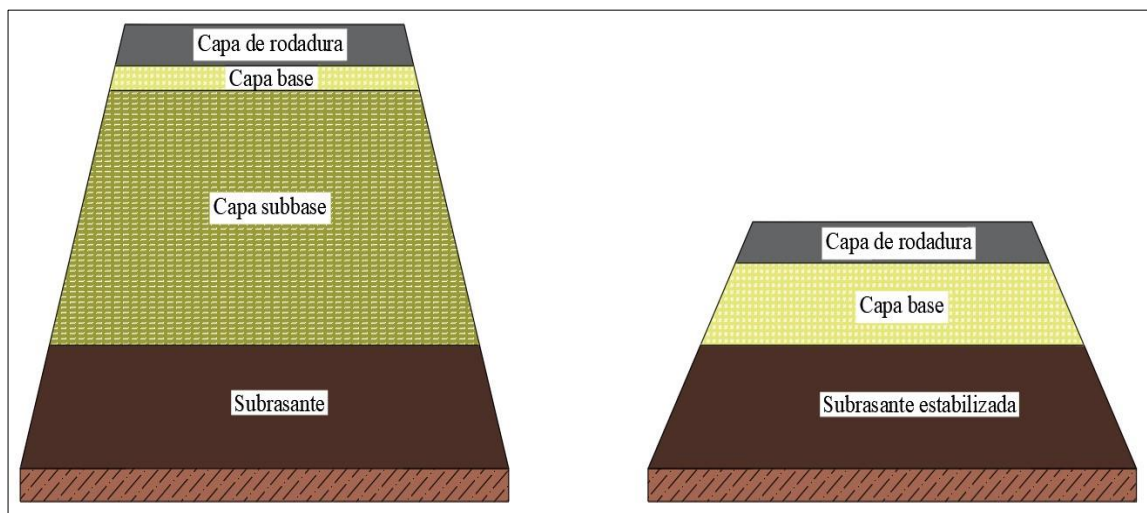
Para esta investigación, se ha decidido diseñar una estructura de pavimento flexible. Este tipo de pavimento es la elección preferida para caminos con bajo volumen de tráfico, ya que tiene la capacidad de distribuir y absorber eficientemente las cargas del tráfico, incluso en circunstancias donde las cargas puedan variar. Además, ofrece la ventaja de ser más económico en comparación con el pavimento rígido.

**Tabla 3.25** Resumen de resultados de los espesores por capas del pavimento

Descripción	Subrasante sin estabilizar	Subrasante estabilizada
	Espesor de capa (cm)	Espesor de capa (cm)
Capa subbase	31	0
Capa base	3	10
Capa de rodadura	5	5

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.23** Estructura del pavimento con subrasante no estabilizada y estabilizada



**Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 3.23, se observa que la estructura del pavimento con subrasante no estabilizada presenta una altura superior en comparación con la subrasante estabilizada. Dicha estabilización conlleva la eliminación de la capa subbase en su totalidad, esto se debe al incremento del índice CBR, producto de la estabilización aplicando hidróxido de calcio y cemento con la dosificación óptima.

### 3.11 Análisis de precios unitarios

La elaboración de presupuestos es un aspecto importante en los proyectos de construcción. Con el propósito de calcular los costos asociados a las capas de la estructura del pavimento, se llevó a cabo un análisis de precios unitarios, considerando cada una de las actividades con sus incidencias directas e indirectas.

### 3.11.1 Costos directos

El costo directo se compone de tres elementos que dependen del tipo de actividad que se está realizando el costo. La estructura que tienen los costos directos en cada Ítem de construcción, está conformada por:

- Materiales.
- Mano de obra.
- Maquinaria y equipo

### 3.11.2 Costos indirectos

Los costos indirectos son los gastos que por su naturaleza son de aplicación a las obras ejecutadas en un tiempo determinado, formando parte de los siguientes aspectos:

- Leyes sociales y de trabajo.
- Amortización o alquiler de maquinaria y equipo.
- Gastos generales

### 3.11.3 Precios unitarios de la estructura del pavimento

Una vez realizado el cálculo de los precios unitarios, a continuación, se presenta el presupuesto correspondiente para cada actividad del pavimento.

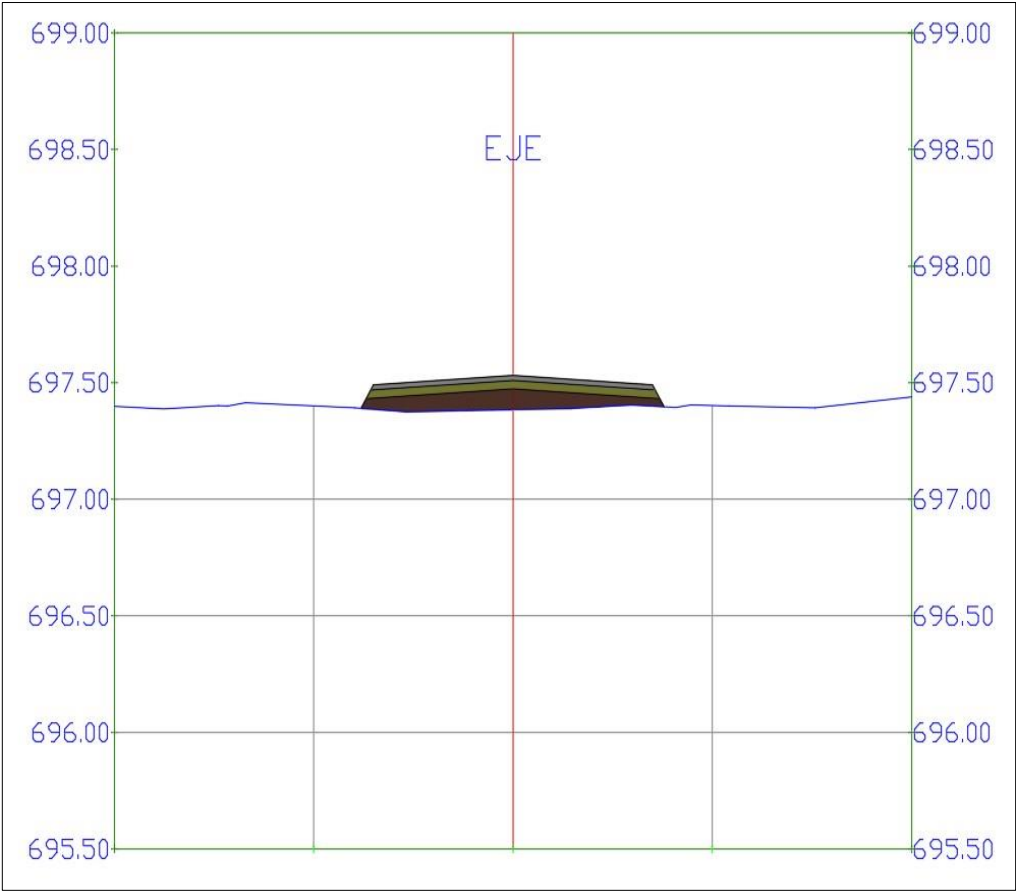
**Tabla 3.26** Presupuesto general de la estructura del pavimento

Descripción	Subrasante sin estabilizar				Subrasante estabilizada		
	Unid.	Cant.	P.U.	Precio parcial	Cant.	P.U.	Precio parcial
Subrasante	m <sup>3</sup>	60	48,77	2926,20	60	179,84	10790,40
Conformación capa subbase	m <sup>3</sup>	132	194,60	25687,20			
Conformación capa base	m <sup>3</sup>	12	225,78	2709,36	40	225,78	9031,20
Carpeta de concreto asfáltico	m <sup>3</sup>	20	737,11	14742,20	20	737,11	14742,20
Total presupuesto (Bs)			46064,96			34563,80	

**Fuente:** Elaboración propia

los resultados reflejan en la Tabla 3.26, que el presupuesto general experimenta una disminución significativa del 25% cuando se opta por una subrasante estabilizada en lugar de una subrasante no estabilizada. Esta reducción se explica por la mejora de las propiedades de la subrasante, lo que permite reducir los espesores necesarios y, como consecuencia, disminuir el costo total del proyecto.

**Figura 3.24** Sección del pavimento



**Fuente:** Elaboración propia



**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo tiene como objetivo analizar e interpretar los resultados obtenidos de la caracterización de los suelos arcillosos de la comunidad de Cañon Oculto en su estado natural, así como los resultados obtenidos después de aplicar la estabilización utilizando hidróxido de calcio y cemento.

**Tabla 4.1** Resultados de la caracterización de los suelos arcillosos a estabilizar

Muestra	% Que pasa tamíz N°200	LL	LP	IP	Clasificación SUCS	Hum. óptima (%)	Dens. máx. (g/cm <sup>3</sup> )	CBR al 95 (%)	Exp. (%)
M-01	97,41	45	25	20	CL	15,16	1,83	2	3,53
M-02	91,52	41	25	16	CL	15,04	1,85	3	3,37
M-03	93,29	42	24	18	CL	15,52	1,84	2	3,46

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4.2** Resumen de resultados de la estabilización mediante Ca(OH)<sub>2</sub> y cemento

Muestra	Descripción	LL	LP	IP	Hum. óptima (%)	Dens. máx. (g/cm <sup>3</sup> )	CBR al 95 (%)	Exp. (%)
M-01	3% Ca(OH) <sub>2</sub>	41	28	13	15,82	1,82	6	1,46
	5% Ca(OH) <sub>2</sub>	38	30	8	16,87	1,81	10	0,89
	7% Ca(OH) <sub>2</sub>	37	31	6	17,41	1,80	12	0,56
M-01	10% cemento	43	27	16	14,69	1,86	19	1,97
	13% cemento	40	27	13	13,86	1,90	20	1,61
	16% cemento	38	29	9	13,02	1,92	28	1,02
M-01	2% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	41	31	10	14,96	1,85	14	1,44
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -2% Cto.	40	31	9	15,14	1,84	12	1,09
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -4% Cto.	40	32	8	14,78	1,86	16	0,76
	4% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	39	31	8	14,81	1,85	15	0,58
M-02	2% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	38	29	9	14,64	1,87	16	1,11
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -2% Cto.	37	30	7	14,87	1,86	15	0,76
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -4% Cto.	37	31	6	13,81	1,88	20	0,75
	4% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	35	0	N.P.	13,67	1,89	19	0,43
M-03	2% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	40	30	10	14,57	1,86	15	1,28
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -2% Cto.	39	31	8	14,83	1,85	13	0,86
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -4% Cto.	38	32	6	13,75	1,87	17	0,81
	4% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	37	0	N.P.	13,51	1,87	17	0,48

**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.1 Análisis de resultados de los suelos en estado natural**

La caracterización de las muestras se realizó a través de la ejecución de una serie de ensayos que permitieron determinar sus propiedades físico mecánicas.

En la Tabla 4.1 se puede observar que la muestra M-01 presenta un contenido de finos del 97,41%, un 91,52% de la muestra M-02 y un 93,29% correspondiente a la muestra M-03, se trata de muestras de suelos arcillosos con un alto contenido de material fino, por lo que el porcentaje de grava es nulo.

Se puede observar en la Tabla 4.1, que las muestras de suelos arcillosos proveniente de la comunidad de Cañon Oculito presenta un límite líquido de 45%, 41% y 42%, un límite plástico de 25%, 25%, 24% y un índice de plasticidad igual a 20%, 16% y 18%.

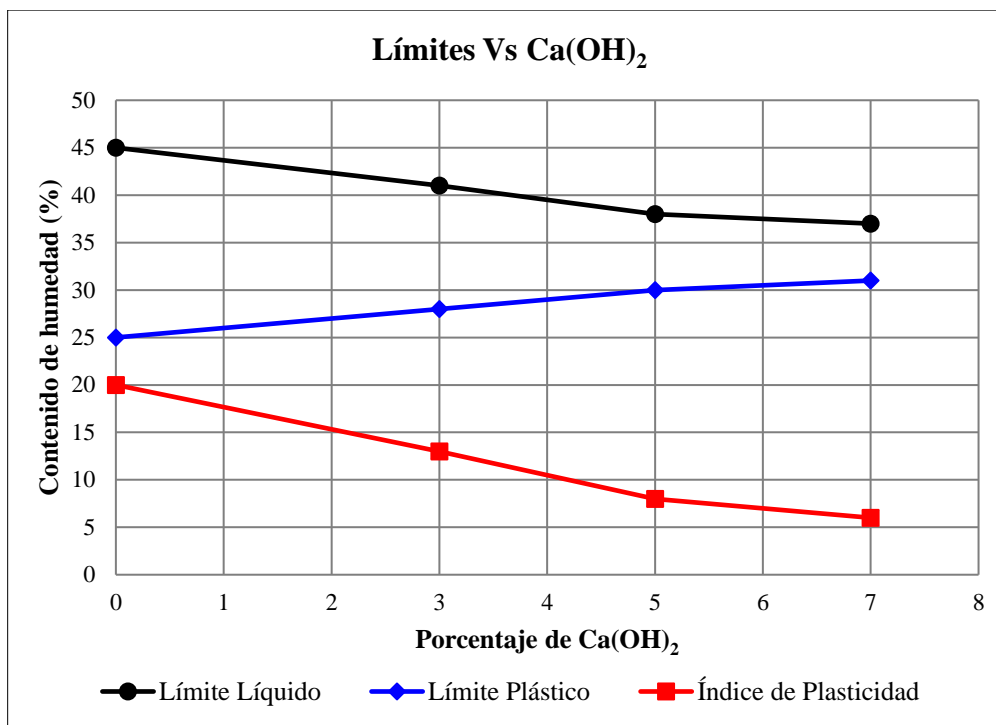
Los datos observados en la Tabla 4.1, revelan que las tres muestras analizadas en la presente investigación, se clasificaron como suelos CL en el sistema SUCS, tratándose de suelos arcillosos.

Según los resultados registrados en la Tabla 4.1, las muestras estudiadas presentan una densidad máxima seca de 1,83 g/cm<sup>3</sup>, 1,85 g/cm<sup>3</sup> y 1,84 g/cm<sup>3</sup>, así también una humedad óptima del 15,16%, 15,04% y 15,52%.

Los resultados expuestos en la Tabla 4.1, indican que el valor del CBR de las muestras analizadas son del 2%, 3% y 2% respectivamente. Además, se observa que estas muestras presentan una expansión del 3,46%, 3,17% y 3,39%. Estos datos indican que las muestras presentan una capacidad portante baja y se clasifica como una subrasante inadecuada.

## 4.2 Análisis de la estabilización suelo - hidróxido de calcio

Gráfico 4.1 Influencia del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en los límites de Atterberg



Fuente: Elaboración propia

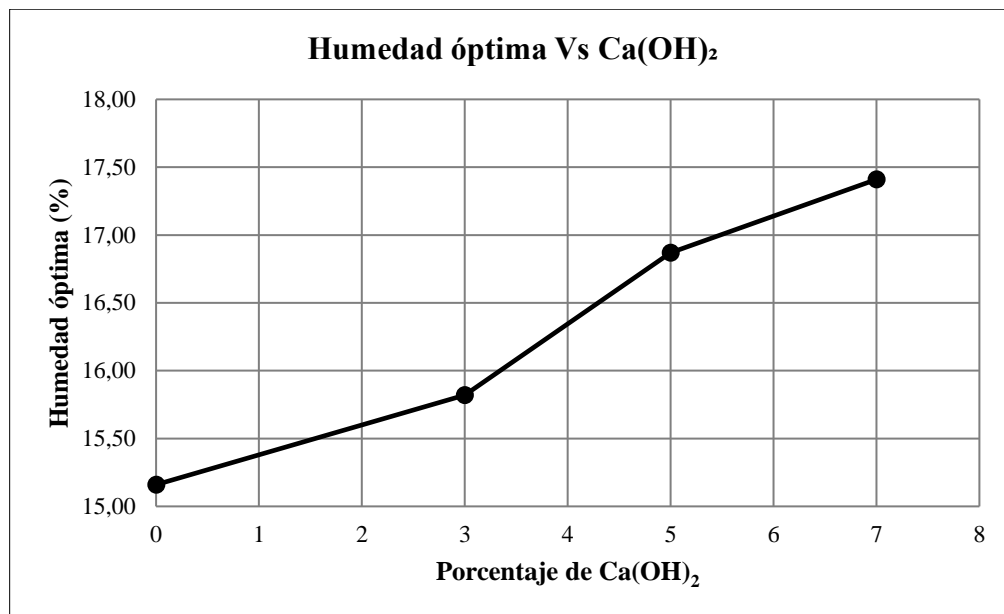
En el Gráfico 4.1 se puede observar que los valores de límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad varían según el porcentaje de hidróxido de calcio de 3%, 5% y 7%. El límite líquido disminuye desde 45% sin  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hasta 37% con 7% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , reduciendo un 8%, se observa también que el límite plástico tiene un cambio menor al del límite líquido, aumentando desde 25% hasta 31% con 7% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , teniendo un incremento del 6%.

Del mismo modo, se observa en el Gráfico 4.1, que los valores del límite líquido y límite plástico presentan cambios significativos para contenidos de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  menores al 5%.

El índice de plasticidad disminuye de manera considerable para contenidos de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  menores al 5%, luego continúa disminuyendo ligeramente hasta alcanzar un IP igual a 6% con un 7% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Esto se debe a que las arcillas contienen una gran cantidad de iones intercambiables en su estructura cristalina, cuando se le agrega hidróxido de calcio al suelo arcilloso, se produce una reacción química llamada hidratación, en la que el

hidróxido de calcio reacciona con el agua presente en la arcilla. El hidróxido de calcio durante la hidratación tiene la capacidad de reaccionar con los iones intercambiables de la arcilla y tiene como resultado la sustitución de los iones sodio y potasio por iones calcio, que tienen un tamaño mayor y una carga eléctrica doble en comparación con los iones de sodio y potasio. La sustitución de los iones sodio y potasio por iones calcio causa un efecto de desestabilización en la estructura cristalina de la arcilla, lo que reduce la plasticidad del suelo.

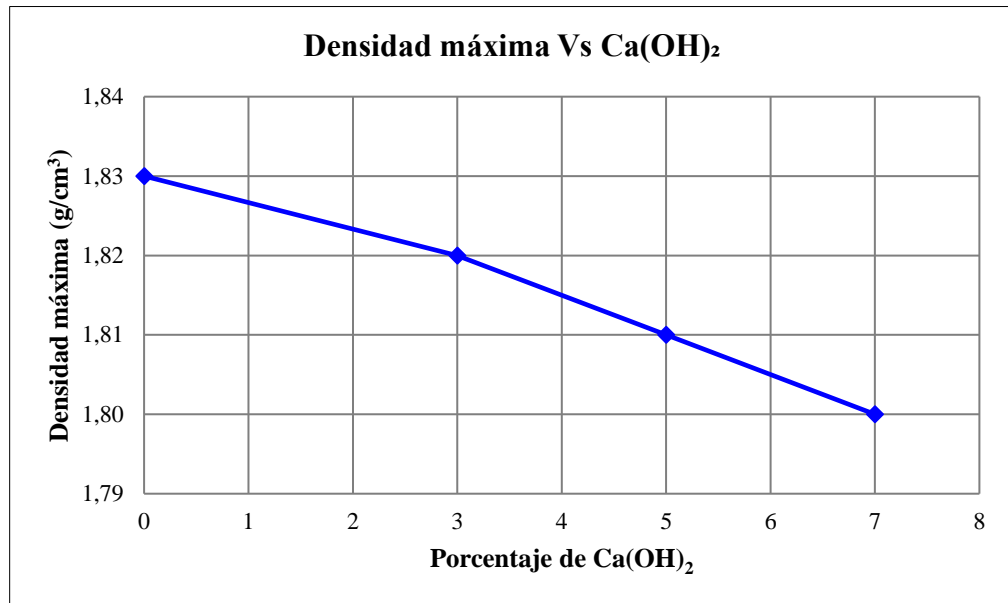
**Gráfico 4.2** Influencia del  $\text{Ca(OH)}_2$  en la humedad óptima



**Fuente:** Elaboración propia

En el Gráfico 4.2 se puede apreciar una alteración que sufre el contenido de humedad óptima de compactación del suelo según el incremento de  $\text{Ca(OH)}_2$ , aumentando su valor desde 15,16% en el suelo natural hasta 17,41% con la adición de 7% de  $\text{Ca(OH)}_2$ , teniendo un incremento de 2,25%.

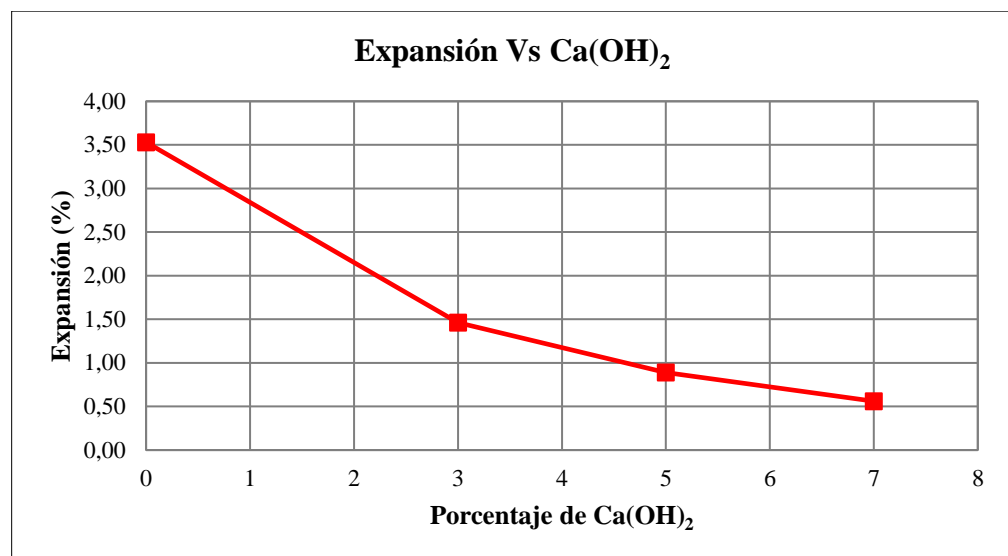
**Gráfico 4.3** Influencia del  $\text{Ca(OH)}_2$  en la densidad máxima



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en el Gráfico 4.3 que la adición de  $\text{Ca(OH)}_2$  disminuye la densidad seca de  $1,83 \text{ g/cm}^3$  en la muestra sin estabilizar, hasta  $1,80 \text{ g/cm}^3$  con la adición del 7% de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Esto se debe al intercambio iónico que se produce cuando se mezcla el hidróxido de calcio con el suelo arcilloso, como consecuencia de esto se forman vacíos o poros, convirtiendo la mezcla compactada más porosa y con una densidad menor.

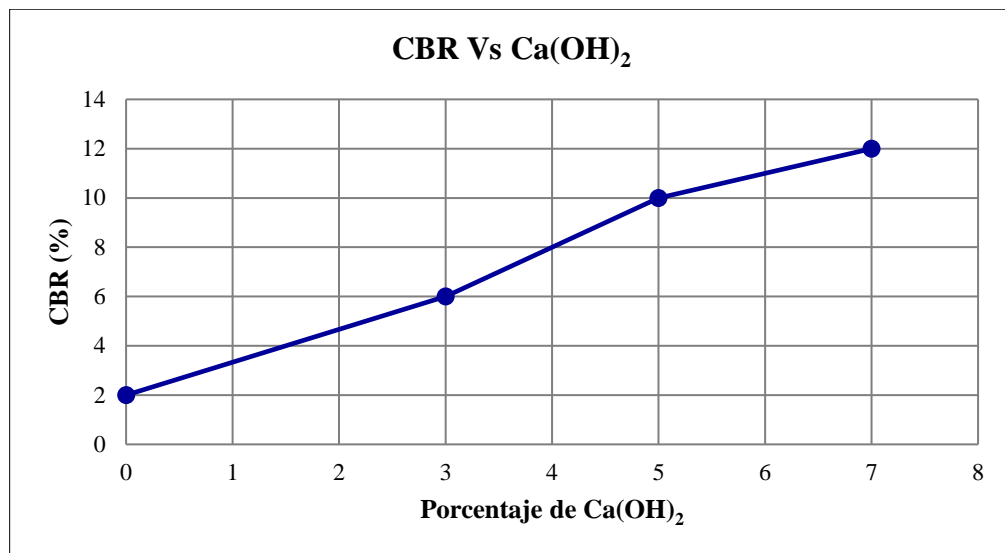
**Gráfico 4.4** Influencia del  $\text{Ca(OH)}_2$  en la expansión



**Fuente:** Elaboración propia

El Gráfico 4.4 muestra una disminución notable en la expansión para contenidos de  $\text{Ca(OH)}_2$  menores al 5%, luego la expansión continua disminuyendo con el 7% de  $\text{Ca(OH)}_2$  pero en menor proporción. El motivo por el cual la expansión reduce se debe a la reacción de iones de calcio del hidróxido de calcio con los iones de sodio y potasio en la arcilla, formando sales insolubles de calcio y eliminando los iones de sodio y potasio de los espacios interlaminares. Esto reduce la repulsión entre las partículas de arcilla y, por lo tanto, reduce la expansión del suelo.

**Gráfico 4.5** Influencia del  $\text{Ca(OH)}_2$  en el CBR

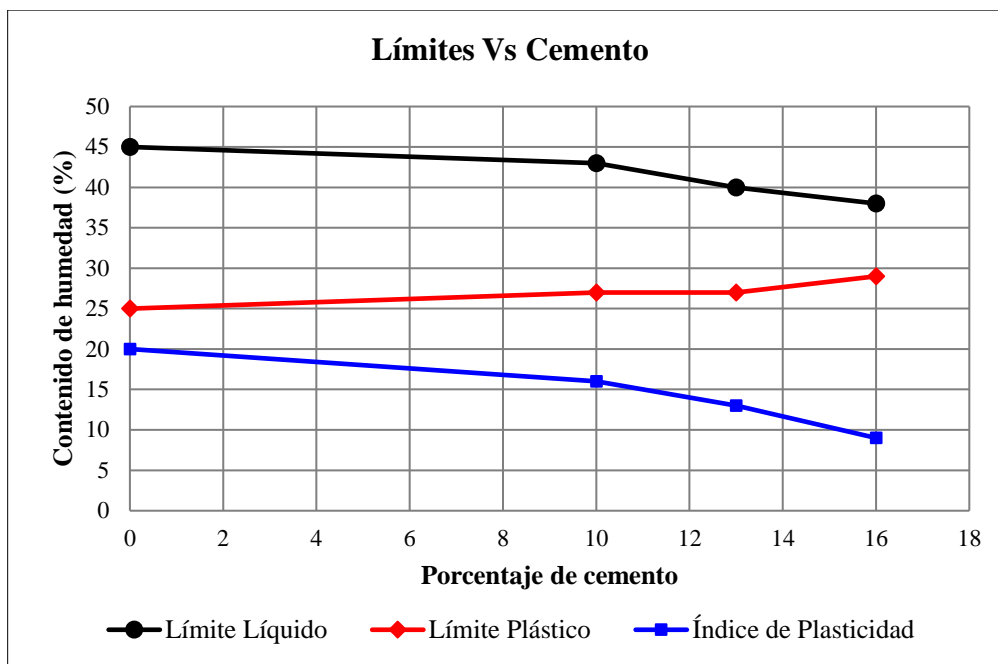


**Fuente:** Elaboración propia

El valor de CBR al 95% de su densidad máxima refleja un aumento en el Gráfico 4.5, asciende desde 2% en el suelo natural, hasta 12% con el 7% de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Esto se debe a que el hidróxido de calcio reacciona con la arcilla, durante esta reacción el hidróxido de calcio libera iones hidróxido en presencia de agua. Los iones hidróxido reaccionan con los iones presentes en las arcillas, como el aluminio y el hierro, formando compuestos insolubles. Estos compuestos contribuyen a la formación de una matriz más resistente y cohesiva en el suelo, lo que aumenta su capacidad portante al suelo.

### 4.3 Análisis de la estabilización suelo - cemento

Gráfico 4.6 Influencia del cemento en los límites de Atterberg



Fuente: Elaboración propia

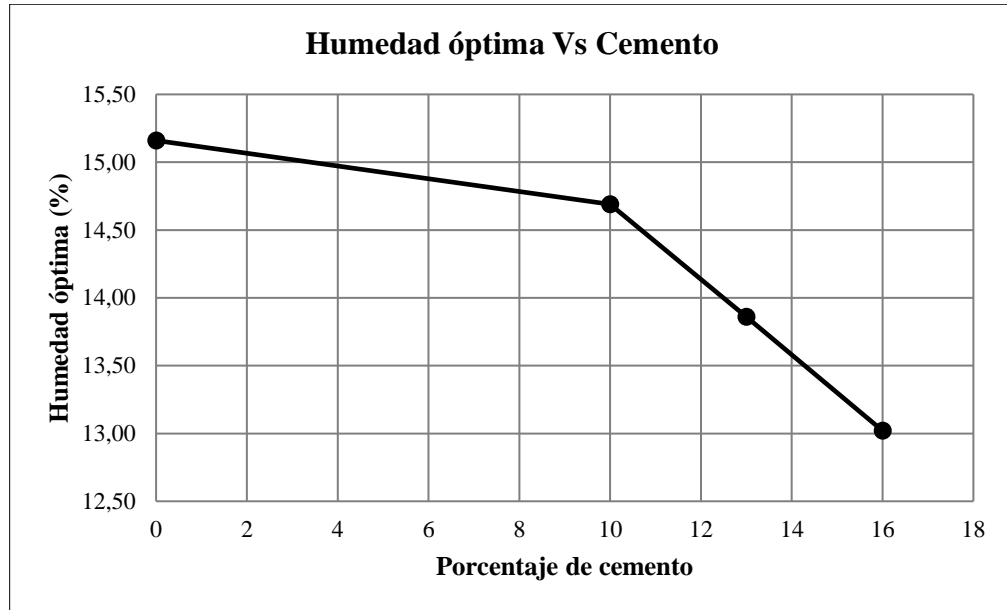
En el Gráfico 4.6 se observa que el límite líquido disminuye según la adición de 10%, 13% y 16% de cemento desde 45% para el suelo sin estabilizar, hasta 38%, con la adición del 16% de cemento, el límite plástico aumenta ligeramente desde 25% sin cemento, hasta 29% con el 16% de cemento, presentando un incremento de 4%. así mismo se aprecia que el índice de plasticidad tuvo un decremento de 20% para el suelo en estado natural, hasta el 9%, siendo 16% el porcentaje de cemento que más reducción obtuvo en el índice de plasticidad.

Por otro lado, se puede observar que tanto el hidróxido de calcio como el cemento, reducen el índice de plasticidad, pero en diferentes proporciones. Esto se debe a que el hidróxido de calcio tiene una alta capacidad de intercambio iónico, lo que significa que puede intercambiar fácilmente iones con los iones de la arcilla, estos iones son los responsables de la capacidad de la arcilla para retener agua y darle su propiedad plástica característica. Por otro lado, el cemento en lugar de reemplazar los iones en las superficies de las partículas de arcilla, el cemento reacciona con los iones de la arcilla para formar productos de hidratación (silicato y aluminato de calcio hidratados). Estos productos de hidratación,



a diferencia del intercambio de iones, no reducen significativamente el índice de plasticidad de la arcilla.

**Gráfico 4.7** Influencia del cemento en la humedad óptima

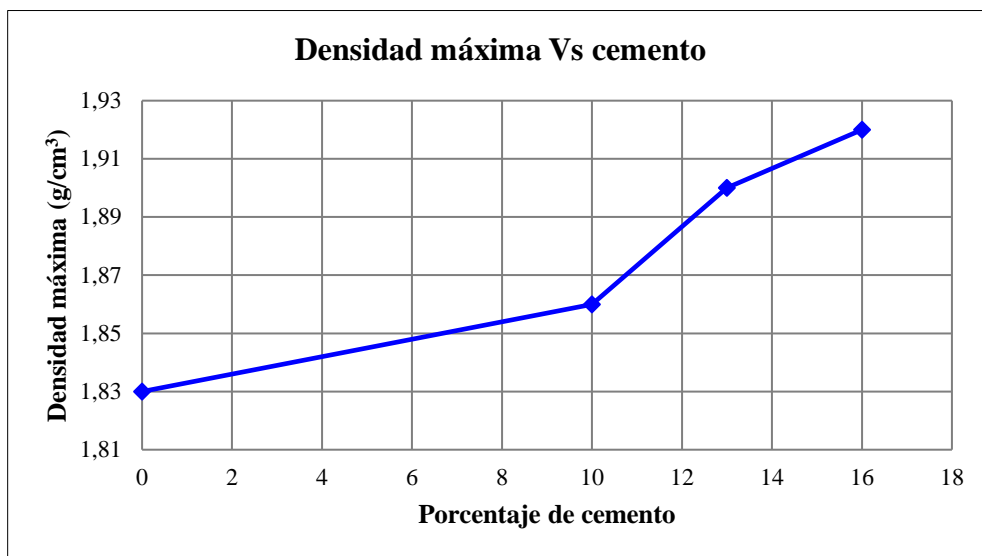


**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en el Gráfico 4.7, que el contenido de humedad óptima muestra una disminución conforme se va aumentando contenido de cemento, desde 15,16% sin cemento, hasta alcanzar el 13,02% con el 16% de cemento.

El motivo por el cual la humedad óptima reduce es por la la formación de compuestos hidratados de silicato y aluminato de calcio. Estos compuestos hidratados tienen una alta capacidad de absorción de agua. Como resultado, se requiere una menor cantidad de agua para alcanzar la humedad óptima del suelo.

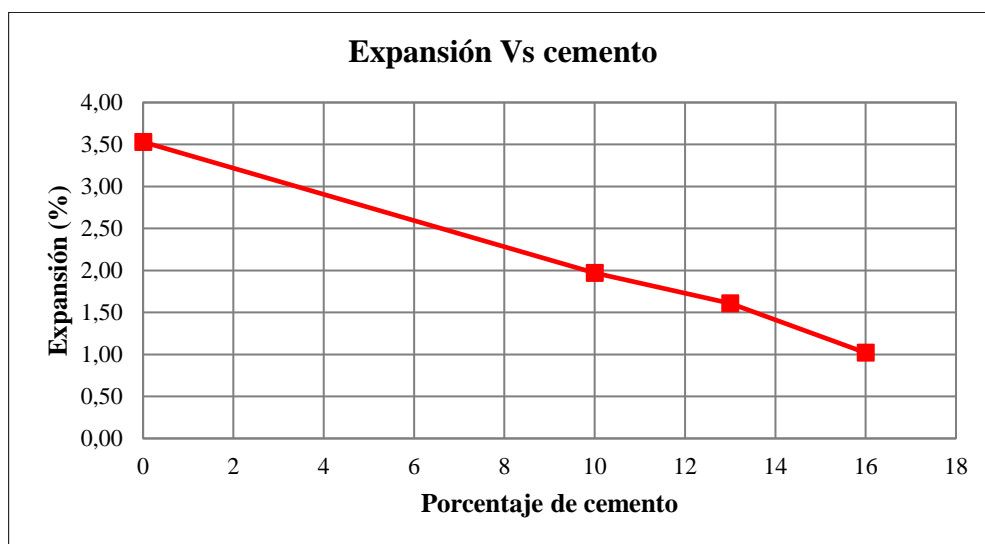
**Gráfico 4.8** Influencia del cemento en la densidad máxima



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en el Gráfico 4.8, que la densidad máxima muestra un incremento según se va aumentando la cantidad de cemento, desde 1,83 g/cm<sup>3</sup> para el suelo sin estabilizar, hasta 1,92 g/cm<sup>3</sup> con la adición de un 16% de cemento. El incremento se debe a la formación de compuestos hidratados de silicato y aluminato de calcio que se produce al mezclar el cemento con la arcilla, proporcionando una estructura cohesiva al suelo, y logrando un aumento en su densidad máxima.

**Gráfico 4.9** Influencia del cemento en la expansión

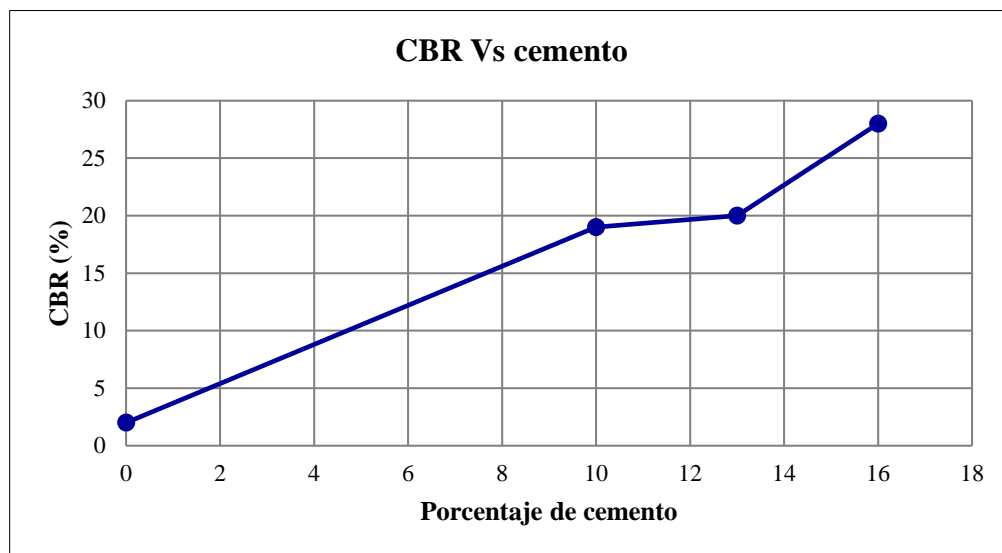


**Fuente:** Elaboración propia

El Gráfico 4.9 indica una reducción de la expansión del suelo a medida que se agrega más cemento, la expansión disminuye de 3,53% sin cemento, hasta 1,02% adicionando 16% de cemento. La razón de la reducción de la expansión del suelo, está relacionada a la formación de compuestos de silicato de calcio y aluminio hidratado, estos compuestos son el producto de la reacción que se tiene al momento de añadir cemento a la muestra arcillosa, dichos compuestos forman una matriz sólida que rodea las partículas de arcilla y las une entre sí, reduciendo su capacidad de expansión.

El cemento tiene una capacidad similar al hidróxido de calcio para reducir la expansión del suelo, aunque su efectividad es menor en comparación con la del hidróxido de calcio. Esto porque la reacción química que se produce al mezclar el suelo arcilloso con cemento es diferente a la reacción química que se produce cuando se mezcla a la arcilla con el hidróxido de calcio.

**Gráfico 4.10** Influencia del cemento en el CBR



**Fuente:** Elaboración propia

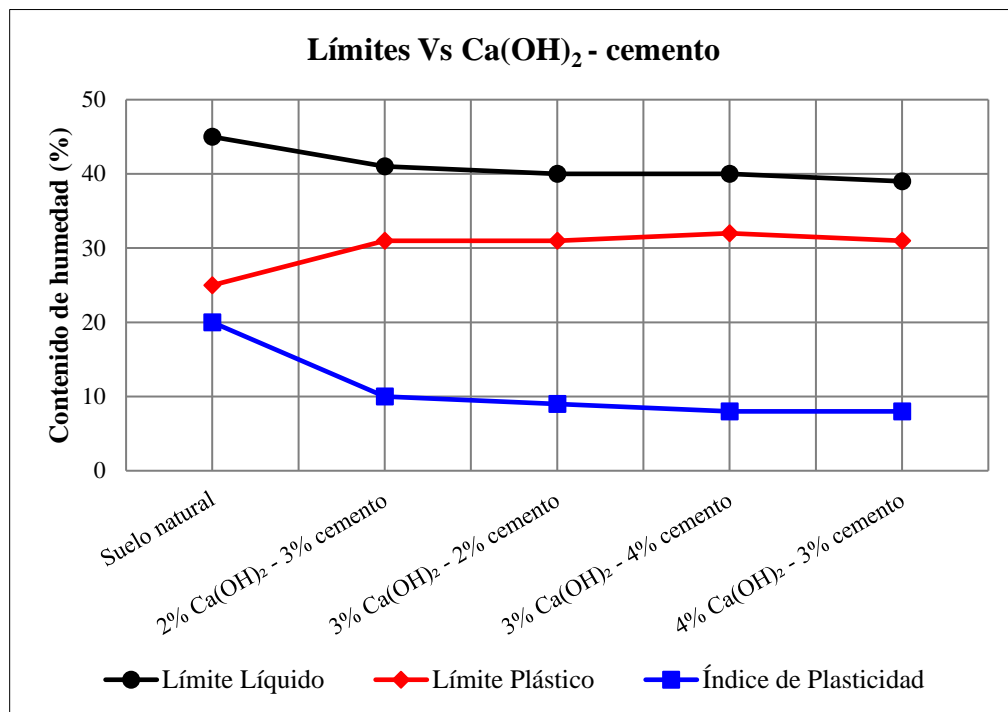
En el Gráfico 4.10 se puede apreciar que el CBR a un 95% experimenta un aumento considerable, desde 2% para el suelo natural, hasta alcanzar un 28% adicionando 16% de cemento, haciendo notable la mejoría del CBR del suelo analizado. Cuando se utiliza cemento para estabilizar arcillas, ocurre una reacción química, durante este proceso, el cemento forma compuestos hidratados como el silicato y aluminato de calcio hidratados. Estos compuestos hidratados actúan como un aglutinante, teniendo la capacidad de unir

las partículas de arcilla y formar una estructura más rígida y cohesiva, aumentando su capacidad portante del suelo.

#### 4.4 Análisis de la estabilización suelo - hidróxido de calcio - cemento

Después de analizar los resultados logrados mediante la estabilización suelo - hidróxido de calcio y suelo - cemento, se pudo notar que ambos aditivos tienen un impacto positivo en las propiedades del suelo, sin embargo, el hidróxido de calcio muestra una efectividad diferente en comparación con el cemento. Por lo tanto, la estabilización mixta se presenta como una opción favorable, ya que un aditivo compensa las limitaciones del otro.

**Gráfico 4.11** Influencia de la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento en los límites de Atterberg para la muestra M-01

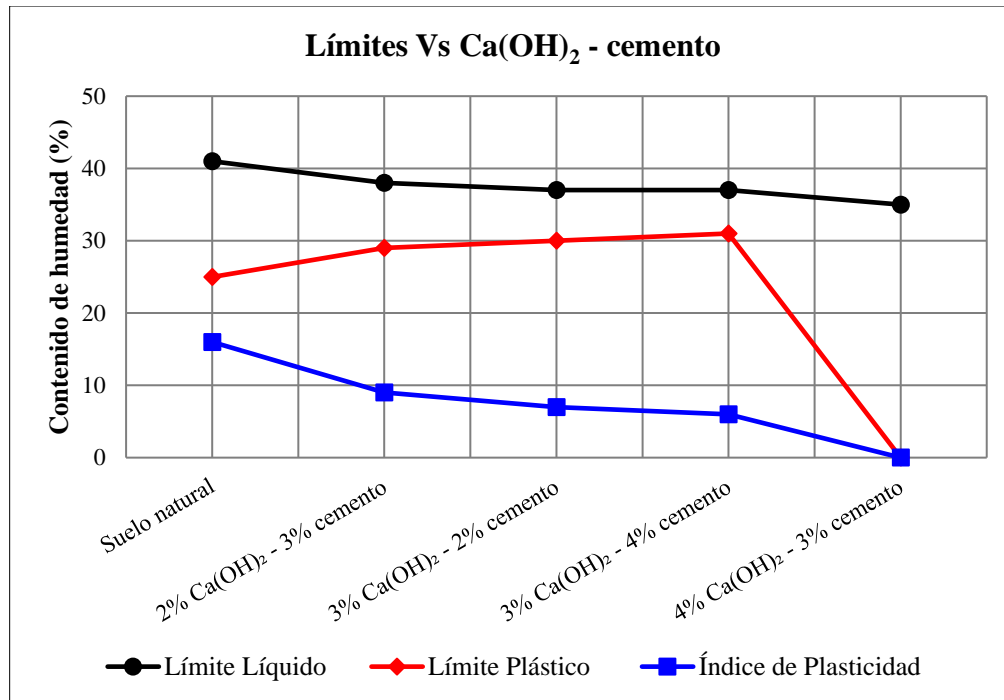


**Fuente:** Elaboración propia

El Gráfico 4.11 refleja que la adición del hidróxido de calcio con cemento produce cambios en los límites líquidos, límites plásticos e índice de plasticidad en todos los grupos analizados de la muestra M-01. El límite líquido reduce según el grupo de combinación aplicado desde 45%, hasta 39% con la adición de 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento. El límite plástico aumenta desde 25% sin estabilizar, hasta 32% con la adición

3%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 4% cemento, a partir de este grupo de combinación el límite plástico disminuye alcanzando un valor de 31%, aplicando 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento.

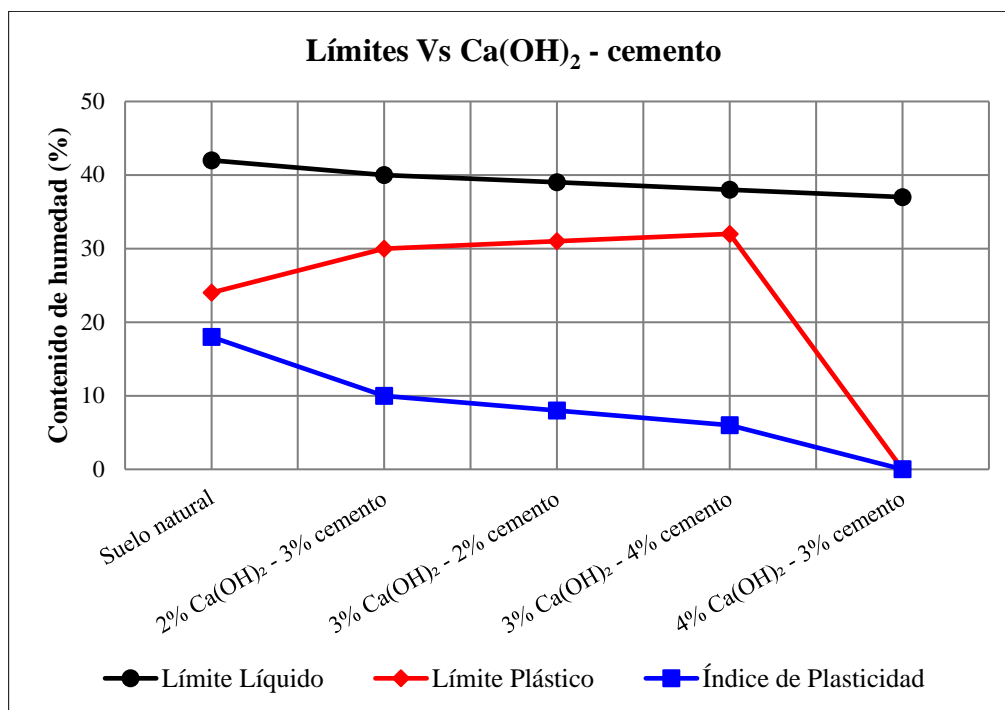
**Gráfico 4.12** Influencia de la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento en los límites de Atterberg para la muestra M-02



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en el Gráfico 4.12 que al igual que la muestra M-01, la muestra M-02 presenta cambios similares en sus límites de Atterberg, reduciendo el límite líquido desde 41% para el suelo natural, hasta 35% aplicando 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento. El límite plástico experimenta un incremento hasta el 31% con la adición de 3%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 4% cemento, a partir de este grupo el límite plástico no pudo ser determinado, llegando a ser un suelo no plástico agregando 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento. El índice de plasticidad reduce desde 16% sin estabilizar, hasta 6% con 3%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 4% cemento, mientras que con la aplicación de 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento, el suelo no presenta plasticidad.

**Gráfico 4.13** Influencia de la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento en los límites de Atterberg para la muestra M-03

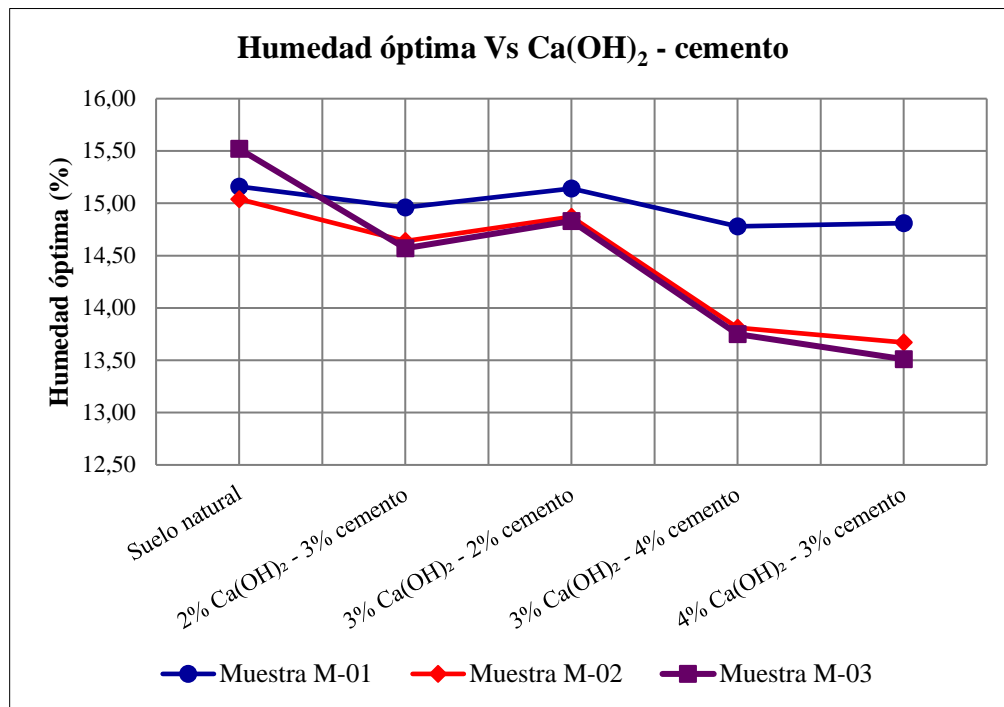


**Fuente:** Elaboración propia

El Gráfico 4.13 correspondiente a la muestra M-03, evidencia que, con la aplicación de hidróxido de calcio con cemento, el límite líquido disminuye desde 42%, hasta 37% agregando 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento, mientras que el límite plástico muestra un aumento desde 24% para el suelo natural, hasta 32% adicionando 3%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 4% cemento, mientras que el índice de plasticidad experimenta una reducción desde 18% sin estabilizar, hasta 6% aplicando 3%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 4% cemento.

También se puede observar que con la aplicación de 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento, el suelo no presenta límite plástico, logrando que el suelo se vuelva no plástico.

**Gráfico 4.14** Influencia del  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento en la humedad óptima

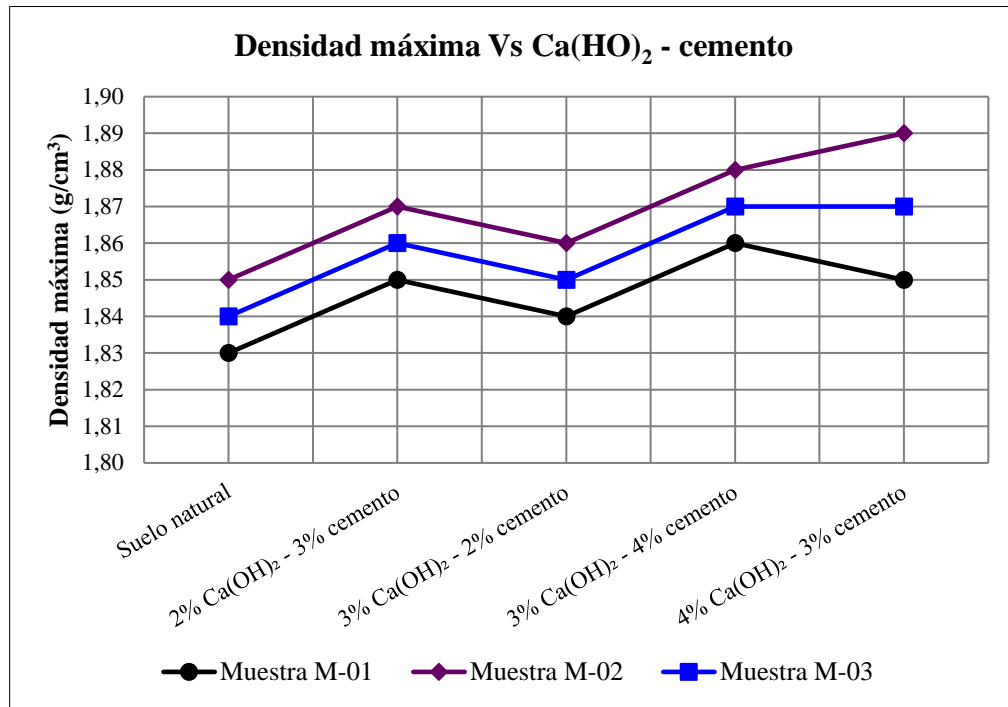


**Fuente:** Elaboración propia

En el Gráfico 4.14 se puede apreciar que la humedad óptima experimenta una reducción cuando se le aplica  $\text{Ca(OH)}_2$  con cemento a las muestras arcillosas. También se puede observar que los grupos de combinación con mayor porcentaje de cemento que  $\text{Ca(OH)}_2$ , experimentan una reducción mayor.

Para la muestra M-01, el grupo que mayor reducción obtuvo en la humedad óptima fue 3%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 4% cemento, con un valor de 14,78%, mientras que para la muestra M-02 y M-03 es el grupo que contiene 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento, obteniendo una humedad óptima de 13,67% y 13,51%.

**Gráfico 4.15** Influencia del  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento en la densidad máxima



**Fuente:** Elaboración propia

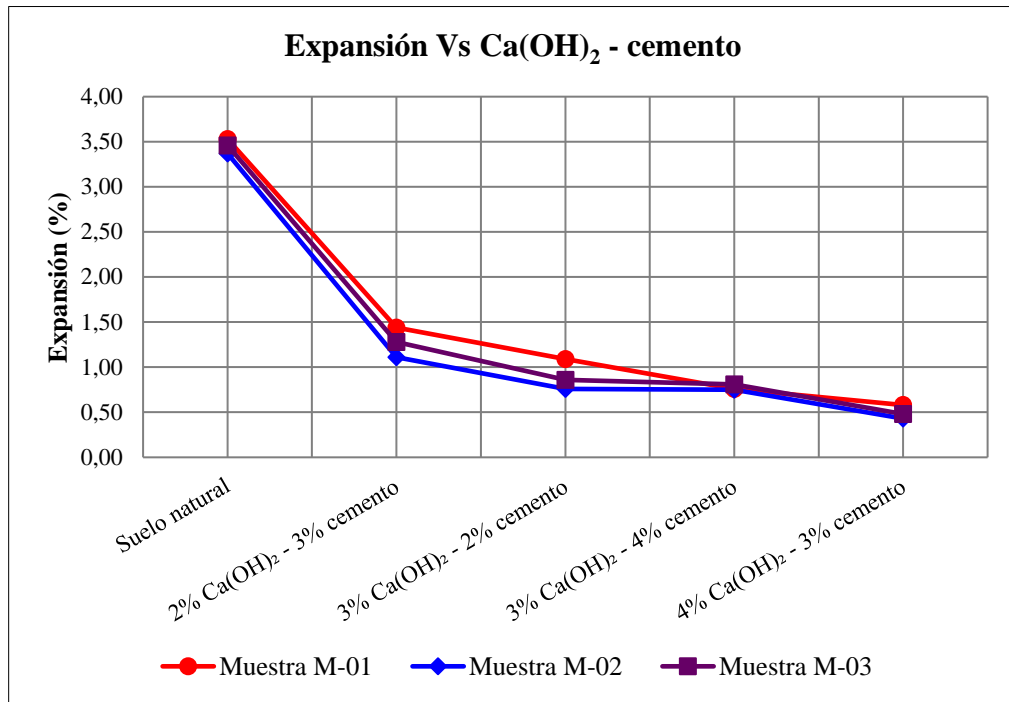
El Gráfico 4.15 muestra como la densidad máxima del suelo incrementa en diferentes proporciones para cada grupo analizado, además se observa que los grupos con mayor contenido de cemento que  $\text{Ca(OH)}_2$  obtienen una densidad máxima mayor.

En el caso de la muestra M-01, el grupo que más incrementó la densidad máxima es aquel que contiene 3%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 4% cemento, aumentando la densidad desde 1,83 g/cm<sup>3</sup>, hasta 1,86 g/cm<sup>3</sup>. En cuanto a la muestra M-02 el grupo que más aumento obtuvo en la densidad máxima es el de 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento, alcanzando un valor de 1,89 g/cm<sup>3</sup>.

Al igual que las demás muestras, la muestra M-03 también aumenta la densidad máxima desde 1,84 g/cm<sup>3</sup> hasta 1,87 g/cm<sup>3</sup> con la adición de 3%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 4% cemento, sin embargo aplicando 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento la densidad mantiene el valor de 1,87 g/cm<sup>3</sup>.



**Gráfico 4.16** Influencia de la mezcla suelo -  $\text{Ca(OH)}_2$  - cemento en la expansión



**Fuente:** Elaboración propia

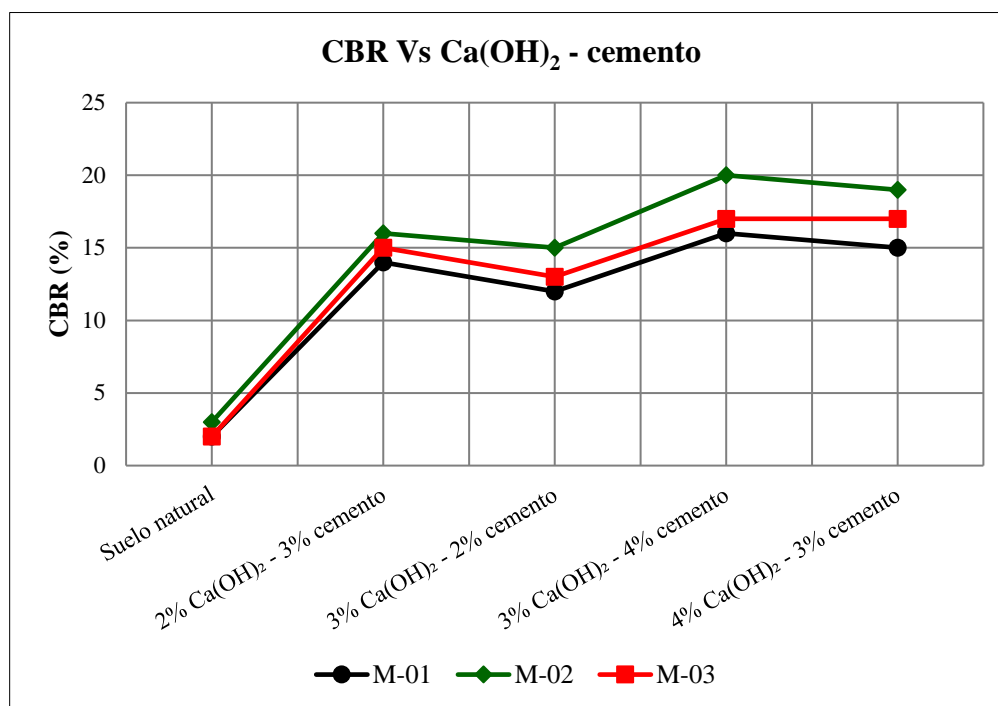
La expansión como se muestra en el Gráfico 4.16, presenta una tendencia descendente. Esto indica que al aplicar  $\text{Ca(OH)}_2$  y cemento a las muestras arcillosas, la expansión del suelo reduce.

Los valores varían de acuerdo a los diferentes grupos de mezcla que contienen  $\text{Ca(OH)}_2$  y cemento. La muestra M-01 obtiene una reducción en la expansión desde 3,53% sin estabilizar, hasta 0,58%, siendo 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento el grupo que mejor resultado obtuvo. En el caso de la muestra M-02 la expansión experimenta una reducción desde 3,37%, hasta 0,43% agregando 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento.

Al igual que la muestra M-01 y M-02, se observa una disminución de la expansión en la muestra M-03, desde 3,46% para el suelo natural, hasta 0,48% añadiendo 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento.

El grupo de 4%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 3% cemento, es el que mejor efectividad tuvo para reducir la expansión, evidenciando que el mayor contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  respecto del cemento produce un efecto más pronunciado en la reducción de la expansión.

**Gráfico 4.17** Influencia de la mezcla suelo -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - cemento en el CBR



**Fuente:** Elaboración propia

En el Gráfico 4.17, se puede observar que el CBR muestra una tendencia ascendente cuando se le aplica hidróxido de calcio y cemento a las muestras arcillosas. En la muestra M-01 se registra un aumento significativo desde un 2% sin estabilizar, hasta un 16% con una combinación de 3%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - 4% cemento. Así mismo, la muestra M-02 experimenta un incremento desde 3%, hasta 20% al aplicar la mezcla de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - cemento en la proporción de 3% y 4% respectivamente.

De manera similar, la muestra M-03 evidencia un aumento del CBR desde 2% para el suelo natural, hasta alcanzar un 17%, utilizando una mezcla de 3%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - 4% cemento. Además, se puede observar que a medida que se incremente la cantidad de cemento en la mezcla de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - cemento, el valor del CBR aumenta de manera más pronunciada.

#### 4.5 Tratamiento estadístico

##### Prueba de hipótesis t de Student para la variable dependiente “CBR”

La elección del método t de Student para la prueba de hipótesis se basó en su idoneidad para tamaños de muestra inferiores a 30. Esta selección asegura la obtención de resultados sólidos desde un punto de vista estadístico y de fácil interpretación. Para lograr la validación de la hipótesis, se planteó la hipótesis nula (H0) y la hipótesis alternativa (H1).

**Tabla 4.3** Datos de índice de CBR para ser sometidos al tratamiento estadístico

Descripción	CBR (%)		
	M-01	M-02	M-03
Suelo natural	2	3	2
2% Ca(OH) <sub>2</sub> - 3% cemento	14	16	15
3% Ca(OH) <sub>2</sub> - 2% cemento	12	15	13
3% Ca(OH) <sub>2</sub> - 4% cemento	16	20	17
4% Ca(OH) <sub>2</sub> - 3% cemento	15	19	17

**Fuente:** Elaboración propia

**Hipótesis nula (H0):** La media de la resistencia cortante (CBR) del suelo arcilloso estabilizado con hidróxido de calcio y cemento es menor a la media de la resistencia cortante (CBR) del suelo natural.

$$H_0: 15,75\% < \mu$$

**Hipótesis alternativa (H1):** La media de la resistencia cortante (CBR) del suelo arcilloso estabilizado con hidróxido de calcio y cemento es mayor a la media de la resistencia cortante (CBR) del suelo natural.

$$H_1: 15,75\% > \mu$$

##### Nivel de significancia

$$\alpha = 0.05$$

## Prueba de hipótesis

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

$\bar{x} = 15,75$	Media muestral tomada
$\mu = 2,33$	Media considerada por la hipótesis nula
$S_x = 2,30$	Desviación estándar de la muestra
$n = 12$	Número de muestra

$$t = \frac{15,75 - 2,33}{\frac{2,30}{\sqrt{12}}} = 20,21$$

## Grados de libertad

$$df = n - 1 = 12 - 1 = 11$$

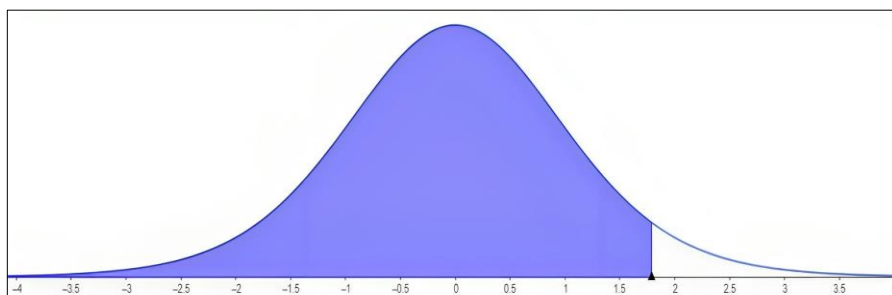
## Determinación del valor crítico t

Para determinar el valor crítico t, ir a la tabla “Puntos porcentuales de la distribución t de Student” (ANEXOS VI), con el grado de libertad = 11 y nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$  (5%).

Valor crítico t = 1,79

## Conclusión

**Figura 4.1** Prueba de hipótesis – CBR



**Fuente:** Elaboración propia

$$\text{Como } t > t_{\text{crítico}}$$

$$20,21 > 1,79$$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que existen diferencias significativas entre las medias analizadas. Dando por conclusión que la media de la resistencia cortante (CBR) del suelo arcilloso estabilizado con hidróxido de calcio y cemento es mayor a la media de la resistencia cortante del suelo en estado natural.

#### **Prueba de hipótesis t de Student para la variable dependiente “Índice de plasticidad”**

**Tabla 4.4** Datos de índice de plasticidad para ser sometidos al tratamiento estadístico

Descripción	IP (%)		
	M-01	M-02	M-03
Suelo natural	20	16	18
2% Ca(OH) <sub>2</sub> - 3% cemento	10	9	10
3% Ca(OH) <sub>2</sub> - 2% cemento	9	7	8
3% Ca(OH) <sub>2</sub> - 4% cemento	8	6	6
4% Ca(OH) <sub>2</sub> - 3% cemento	8	0	0

**Fuente:** Elaboración propia

**Hipótesis nula (H0):** La media del índice de plasticidad del suelo arcilloso estabilizado con hidróxido de calcio y cemento es mayor a la media del índice de plasticidad del suelo natural.

$$H0: 6,75\% > \mu$$

**Hipótesis alternativa (H1):** La media del índice de plasticidad del suelo arcilloso estabilizado con hidróxido de calcio y cemento es menor a la media del índice de plasticidad del suelo natural.

$$H1: 6,75\% < \mu$$

#### **Nivel de significancia**

$$\alpha = 0.05$$

## Prueba de hipótesis

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

$\bar{x} = 6,75$	Media muestral tomada
$\mu = 18$	Media considerada por la hipótesis nula
$S_x = 3,41$	Desviación estándar de la muestra
$n = 12$	Número de muestra

$$t = \frac{6,75 - 18}{\frac{3,41}{\sqrt{12}}} = -11,43$$

## Grados de libertad

$$df = n - 1 = 12 - 1 = 11$$

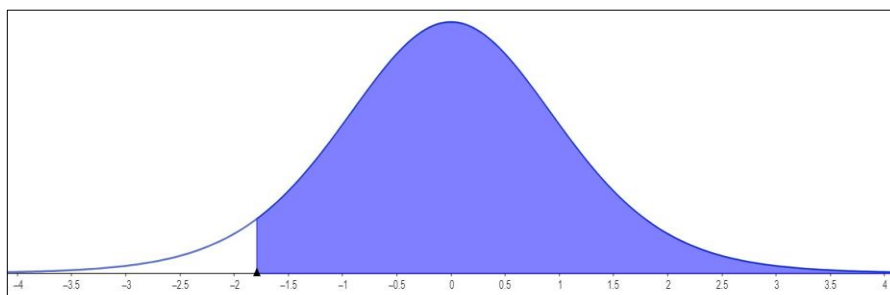
## Determinación del valor crítico t

Para determinar el valor crítico t, ir a la tabla “Puntos porcentuales de la distribución t de Student” (ANEXOS VI), con el grado de libertad = 11 y nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$  (5%).

Valor crítico t = -1,79

## Conclusión

**Figura 4.2** Prueba de hipótesis – índice de plasticidad



**Fuente:** Elaboración propia

$$\text{Como } t < t_{\text{crítico}}$$

$$-11,43 < -1,79$$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que existen diferencias significativas entre las medias analizadas. Dando por conclusión que la media del índice de plasticidad del suelo arcilloso estabilizado con hidróxido de calcio y cemento es menor a la media del índice de plasticidad del suelo en estado natural.

#### 4.6 Dosificación óptima

**Tabla 4.5** Verificación de resultados con las especificaciones requeridas

Muestra	Descripción	Especificaciones Técnicas INVÍAS				Estado
		Límite Líquido $\leq 40$	Índice de Plasticidad $< 10\%$	Expansión $< 2\%$	CBR $\geq 5\%$	
M-01	Suelo natural	45	20	3,53	2	No Cumple
	2% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	41	10	1,44	14	No Cumple
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -2% Cto.	40	9	1,09	12	Cumple
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -4% Cto.	40	8	0,76	16	Cumple
	4% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	39	8	0,58	15	Cumple
M-02	Suelo natural	41	16	3,37	3	No Cumple
	2% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	38	9	1,11	16	Cumple
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -2% Cto.	37	7	0,76	15	Cumple
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -4% Cto.	37	6	0,75	20	Cumple
	4% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	35	N.P.	0,43	19	Cumple
M-03	Suelo natural	42	18	3,46	2	No Cumple
	2% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	40	10	1,28	15	Cumple
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -2% Cto.	39	8	0,86	13	Cumple
	3% Ca(OH) <sub>2</sub> -4% Cto.	38	6	0,81	17	Cumple
	4% Ca(OH) <sub>2</sub> -3% Cto.	37	N.P.	0,48	17	Cumple

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 4.5 se puede apreciar que los tres últimos grupos analizados cumplen con las especificaciones necesarias para su empleo como subrasante en las muestras analizadas. No obstante, el grupo con una proporción de 4% de Ca(OH)<sub>2</sub> y 3% de cemento exhibe resultados que provocan que el suelo se vuelva no plástico. Por esta razón, se descarta que

este grupo sea la opción más óptima, debido a que los suelos no plásticos pueden ser más difíciles de compactar de manera eficiente debido a su falta de cohesión. Por lo tanto, se considera la proporción de 3%  $\text{Ca(OH)}_2$  - 2% cemento como la dosificación óptima para la estabilización de suelos arcillosos de la comunidad de Cañon Oculito aplicando hidróxido de calcio y cemento. Esta dosificación cumple con las especificaciones técnicas requeridas en las tres muestras analizadas y tiene la ventaja de requerir una menor cantidad de estabilizantes en comparación con los otros grupos estudiados.



**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Después de haber realizado el estudio de las características físicas y mecánicas del suelo arcilloso proveniente de la comunidad Cañon Oculto para suelo natural y posteriormente estabilizado aplicando hidróxido de calcio y cemento, llegamos a las siguientes conclusiones:

1. Las muestras arcillosas analizadas presentan un alto contenido de material fino. Además, el índice de plasticidad varía entre el 15% y el 21%, así como valores de CBR que oscilan entre el 2% y el 3%. Estas características indican la necesidad de aplicar un proceso de estabilización a las muestras, ya que son adecuadas para este propósito.
2. Los resultados obtenidos a través de la estabilización suelo - hidróxido de calcio y suelo - cemento respaldan la eficacia diferencial de estos agentes estabilizadores en la mejora de las propiedades físico mecánicas del suelo. La aplicación del hidróxido de calcio ha demostrado una mayor efectividad en la reducción de la plasticidad y la expansión del suelo en comparación con el cemento. En contraste, la estabilización del suelo con cemento ha mostrado resultados más favorables en cuanto a la densidad máxima, humedad óptima y el índice CBR, en comparación con los obtenidos mediante la estabilización suelo - hidróxido de calcio.
3. La aplicación de la estabilización mixta utilizando hidróxido de calcio y cemento ha generado notables modificaciones en la plasticidad del suelo, llegando a alcanzar valores nulos. Cabe destacar que los valores mínimos en el índice de plasticidad se obtuvieron al emplear el porcentaje máximo de hidróxido de calcio en la combinación.
4. A través del ensayo de compactación, se pudo evidenciar que al emplear la mezcla de suelo - hidróxido de calcio - cemento, se logra una disminución en la humedad óptima y un aumento en la densidad máxima del suelo. Es importante resaltar que los valores más bajos de humedad óptima y los valores más altos de densidad máxima se registraron al incrementar el porcentaje de cemento en la combinación.

5. La expansión del suelo fue notablemente reducida, mostrando una disminución significativa que osciló entre el 85% y el 95%. Sin embargo, el CBR de las muestras analizadas experimentó un incremento sustancial, con valores que se incrementaron entre el 590% y el 605% en comparación con el suelo en su estado natural. Es relevante señalar que los resultados más favorables en términos de expansión se obtuvieron con un mayor porcentaje de hidróxido de calcio en la mezcla, mientras que los valores máximos de CBR se lograron con el mayor porcentaje de cemento empleado.
6. El porcentaje óptimo de la mezcla suelo - hidróxido de calcio - cemento se determinó mediante un análisis de los resultados de los ensayos, y se encontró que una proporción de 3% de hidróxido de calcio - 2% de cemento es la más adecuada para las tres muestras evaluadas. Esta elección se fundamenta en su conformidad con las especificaciones técnicas necesarias para su empleo como subrasante.
7. Los resultados obtenidos del diseño del pavimento flexible reflejaron que la calidad del material de la subrasante tiene un impacto significativo en los espesores de las capas del pavimento. Concluyendo que, si la calidad del material de subrasante es mayor, se requieren espesores menores para las capas del pavimento, e incluso en algunos casos, es posible eliminar algunas capas de la estructura del pavimento.
8. En cuanto al análisis económico, se observó que la estabilización de suelos genera un impacto favorable en el presupuesto general de un proyecto vial. Este efecto se atribuye a la mejora de las propiedades físico mecánicas del suelo, lo que conlleva una disminución en los espesores requeridos del proyecto y, en consecuencia, una reducción en el presupuesto general.
9. Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico mediante la prueba de hipótesis t de Student, lo cual permitió concluir que existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras en su estado natural y las muestras estabilizadas mediante la aplicación de hidróxido de calcio y cemento.

10. Finalmente podemos decir que el estudio realizado confirma tanto la hipótesis como los objetivos propuestos en la investigación, lo que confirma la factibilidad de utilizar hidróxido de calcio con cemento como material estabilizante.

## **5.2 Recomendaciones**

1. Se sugiere que los ensayos de laboratorio sean llevados a cabo por una única persona, ya que los resultados varían por la manipulación de diversas maneras de la muestra.
2. Como medida de seguridad, se aconseja llevar a cabo la manipulación de los aditivos con mucho cuidado, con el fin de salvaguardar la integridad física del laboratorista.
3. Se recomienda utilizar el material arcilloso de la comunidad Cañon Oculto, estabilizado con hidróxido de calcio y cemento en una proporción de 3% y 2%, respectivamente, como material idóneo para su utilización como subrasantes, optimizando los espesores de las capas de un pavimento flexible.
4. Se aconseja analizar los resultados obtenidos para determinar la dosificación óptima, teniendo en cuenta el uso previsto del material estabilizado.
5. Se aconseja ejecutar en la ubicación seleccionada el diseño de la estructura del pavimento, lo cual conllevará beneficios significativos para la comunidad.
6. Se sugiere ampliar la investigación sobre la técnica de estabilización mixta para complementar y enriquecer aún más su aplicabilidad.
7. En este estudio, se emplearon hidróxido de calcio y cemento como aditivos en la estabilización del suelo, obteniendo resultados favorables. Se recomienda llevar a cabo investigaciones adicionales que involucren el uso de otros aditivos y diferentes combinaciones, y así pueda haber nuevas alternativas para la estabilización de suelos en obras viales.
8. En la presente investigación se utilizó un suelo arcilloso, el cual mediante la estabilización se obtuvo buenos resultados, se recomienda que futuras investigaciones se enfoquen en analizar otros tipos de suelos con propiedades distintas.