

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL

DISEÑO TEÓRICO

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL DISEÑO TEÓRICO

1.1 Introducción

La estabilización de un suelo está orientada hacia el mejoramiento de sus propiedades ingenieriles: incremento de la resistencia y disminución de la plasticidad en nuestro caso la estabilidad de un suelo está asociada a su capacidad de soporte C.B.R.

Se han realizado estabilizaciones con las soluciones convencionales, como el uso de cal y cemento, han sido utilizadas para mejorar la resistencia de estos suelos; sin embargo, estos métodos son frecuentemente costosos y requieren un mantenimiento regular. Además, a menudo no logran ofrecer la durabilidad esperada en condiciones climáticas adversas. Ante esta situación, surge la necesidad de explorar alternativas nuevas. La Bischofita, que proviene del salar de Uyuni, se presenta como una opción innovadora, capaz de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos de manera efectiva y accesible.

La presente investigación se centra en analizar la efectividad de la Bischofita como estabilizador químico en las propiedades mecánicas de la subrasante, específicamente en el contexto de caminos no pavimentados en la región de Tarija, Bolivia. Estos suelos, que incluyen limos y arcillas, presentan características problemáticas como baja capacidad de soporte y alta plasticidad, lo que compromete la estabilidad y durabilidad de las vías. Esta investigación nos permitirá analizar de manera rigurosa cómo la adición de Bischofita puede influir en la capacidad de soporte (CBR) de los suelos finos. A través de ensayos experimentales, se busca obtener resultados que no solo validen la eficacia de este estabilizador, sino que también ofrezcan una nueva alternativa.

El logro esperado de esta investigación es proporcionar un marco sólido que permita la implementación de la Bischofita como una solución viable para la estabilización de suelos en la región, contribuyendo así al mejoramiento de la infraestructura vial y al desarrollo local.

1.2 Antecedentes

En nuestro medio el material predominante es la arcilla, un tipo de suelo que, debido a sus cambios volumétricos y baja resistencia, hacen que la construcción de carreteras y cualquier construcción civil puedan sufrir contratiempos debido al comportamiento de este suelo en presencia del agua.

Se puede verificar en el estudio realizado por Ana S. Oña Valdez, (2019) análisis de la capacidad de soporte del suelo arcilloso mediante la adición de cloruro de calcio se centra en la adición de cloruro de calcio como método para mejorar las propiedades mecánicas de este tipo de suelo, caracterizado por su alta plasticidad y baja resistencia. A través de ensayos de laboratorio, se determinó que la incorporación de cloruro de calcio no solo incrementa la resistencia del suelo, sino que también reduce su plasticidad, haciéndolo más adecuado para su uso como subrasante en la construcción de caminos. Los resultados evidencian que este tratamiento químico permite optimizar costos en proyectos de construcción, al evitar la necesidad de desalojo del material arcilloso, y promueve un uso más eficiente de los recursos locales, destacando su viabilidad como alternativa en la ingeniería civil.

La presente investigación la “Influencia del Cloruro de Magnesio Hexahidratado en las Propiedades de la Subrasante en Carreteras no Pavimentadas” analiza la influencia del cloruro de magnesio hexahidratado en las propiedades de la subrasante en carreteras no pavimentadas, el objetivo general fue: Evaluar la influencia del cloruro de magnesio hexahidratado en las propiedades de la subrasante en carreteras no pavimentadas y la hipótesis general que se contrastó fue: El cloruro de magnesio hexahidratado influye en las propiedades de la subrasante en carreteras no pavimentadas. Durante la ejecución de la investigación se ha notado la variación de las propiedades del suelo por el uso del cloruro de magnesio hexahidratado en las progresivas 339+100, 339+150 y 339+200 de la zona de estudio las cuales se muestra a continuación.

Por otro lado, el proyecto de investigación Bach. G. Cosiche Aguila (2019), Influencia del cloruro de magnesio hexahidratado en el California Bearing Ratio La propiedad más

importante del suelo es según Bañón & Beviá (2000) el comportamiento mecánico del suelo, conseguir una mejor estabilidad mecánicas que ayuden a mitigar posibles surgimientos de asentamiento diferenciales en tal sentido uno de los métodos más usados con mayor frecuencia para caracterizar el suelo en función a su propiedad mecánica es el CBR. Thenoux & Vera (2002), propone de manera general que una dosificación buena de este material podrá estar entre del 3 % - 5 % de cloruro de magnesio hexahidratado.

De acuerdo a la tesis “Aplicación del cloruro de magnesio como alternativa natural para incrementar la estabilización del suelo de la carretera Juliaca – Caminaca, 2021”. Realizada en la Universidad Cesar Vallejo tiene por objetivo aplicar una nueva técnica de estabilización de suelos para mejorar las propiedades físico mecánicas de la sub rasante de la carretera Juliaca – Caminaca.

Los resultados demostraron que el suelo natural evaluado contempla una CBR de 5.83%, máxima densidad seca 1.82 g/cm^3 y una humedad óptima de 12.66%, así mismo se determinó que los valores de CBR para las dosificaciones 5%, 7% y 9% demostraron resultados de 12.73%, 14.00%, 12.93% respectivamente.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación académica

La estabilización de suelos, particularmente en contextos donde predominan los suelos finos, es un aspecto crucial en la Ingeniería Civil. Este proceso no solo busca mejorar las propiedades mecánicas de los suelos, sino que también tiene un impacto significativo en la durabilidad y seguridad de las infraestructuras viales. En regiones como Tarija, donde el uso de suelos locales es común, la estabilización se convierte en una estrategia eficaz para reducir costos y optimizar recursos.

A pesar de los esfuerzos previos por estabilizar estos suelos mediante métodos tradicionales, como el uso de cal y cemento, muchos de estos enfoques han demostrado ser costosos y en ocasiones ineficaces. Esto resalta la necesidad de investigar alternativas

más sostenibles y accesibles. La Bischofita, un estabilizador químico, ofrece una opción local y económica, dado que se obtiene del salar de Uyuni, el más grande del mundo.

1.3.2 Justificación de la aplicación técnico-práctica

Desde un enfoque técnico-práctico, la estabilización de suelos finos con Bischofita representa una solución innovadora y viable para los desafíos que enfrentan los caminos no pavimentados en Tarija. La investigación evaluará la efectividad de la Bischofita en la mejora de parámetros mecánicos como la capacidad de soporte (CBR). Técnicamente, la Bischofita es un estabilizador soluble y fácil de aplicar. Esto facilita su integración en el suelo de forma homogénea, permitiendo un tratamiento eficiente en el proceso de estabilización en obra. Al requerir menos tiempo y esfuerzo en su aplicación en comparación con otros estabilizadores convencionales, como la cal o el cemento, la Bischofita optimiza el proceso de construcción, permitiendo cubrir áreas extensas con mayor rapidez y menos recurso.

1.3.3 Justificación e importancia social

Al ofrecer soluciones efectivas para estabilizar estos suelos, la investigación contribuirá a mejorar la infraestructura vial, facilitando el transporte y promoviendo el desarrollo socioeconómico. Así, se espera que los resultados de este estudio no solo beneficien a la Ingeniería Civil, sino que también impacten positivamente en la vida cotidiana de los habitantes de la región.

1.4 Planteamiento del problema

1.4.1 Situación problemática

La estabilización química presenta alternativas que pueden mejorar las propiedades de los suelos y hacerlas aptas para su uso como subrasante. Es necesario realizar una serie de ensayos en suelo natural y suelo combinado con Bischofita o en diferentes porcentajes y observar si este químico influye en las mejoras de la capacidad de soporte de los suelos finos.

El objeto de esta investigación es evaluar la efectividad de la Bischofita en suelos finos, con el fin de determinar cómo este aditivo puede mejorar las propiedades mecánicas del suelo y facilitar su uso como subrasante en proyectos de construcción. A través de ensayos de laboratorio, se busca establecer el porcentaje de Bischofita que permita maximizar la resistencia y minimizar la plasticidad, ofreciendo así una solución viable y económica en lugar de los métodos tradicionales que implican el desalojo del material.

Si no se establece claramente que la incorporación de bischofita puede ser efectiva en el proceso de estabilización de suelos finos, es recomendable recurrir a materiales convencionales ya probados, como el cloruro de calcio, cal o cemento. Sin embargo, el uso de estos aditivos puede conllevar costos significativos y generar impactos negativos en el medio ambiente durante su aplicación, lo que subraya la necesidad de investigar y validar alternativas más sostenibles y eficientes.

Se centra en analizar de manera integral el comportamiento de los suelos finos bajo la influencia de la bischofita. Este enfoque experimental permite no solo entender cómo se modifican las propiedades del suelo, sino también desarrollar recomendaciones prácticas que contribuyan a una construcción más sostenible y eficiente en la región.

1.4.2 Delimitación espacial y temporal.

- **Delimitación temporal:** La investigación se desarrolla en un periodo específico que abarca desde la planificación y muestreo inicial, los ensayos de laboratorio para analizar las propiedades del suelo y los efectos de la Bischofita, hasta el análisis y validación de los resultados. Dependiendo de la duración de cada fase. Esto incluye tanto la recopilación de datos de campo como las pruebas de laboratorio y el análisis final para obtener conclusiones precisas sobre la estabilización.

Tabla 1.1: Delimitación temporal

Fecha aproximada	Evento	¿Cómo tributa este dato?
Agosto de 2023	Investigación acerca del tema de interés	Se investiga las diferentes metodologías de estabilización de suelos y sus aplicaciones
Septiembre de 2023	Se define el ámbito de la investigación	Define el alcance que tendrá el presente estudio, el cual tratará a suelos cohesivos
Noviembre de 2023	Se lleva a cabo la junta de departamento	Esto es una junta de departamento
Diciembre de 2023	Se aprueba la asignatura CIV-501	Se aprueba el tema con su metodología y alcance propuestos
Febrero de 2024	Se inicia los trámites de laboratorio	Para permitir el uso del laboratorio de suelos para desarrollar la investigación del tema
Marzo de 2024	Se inicia con la recolección de muestras	Para obtener las muestras necesarias para desarrollar el tema de investigación
Marzo de 2024	Se caracteriza las muestras obtenidas	Se tiene que conocer las características y tipos de suelo con los que se cuenta en la zona de estudio
Abril de 2024	Caracterización del aditivo	Para conocer las características que tendrá el aditivo combinado
Abril de 2024	Inicio de las pruebas de prediseño	Se conocerá en que porcentajes se tiene mayor eficiencia por parte del aditivo
Octubre de 2024	Predefensa	Se realiza la predefensa del proyecto
Noviembre de 2024	Correcciones	Se realiza las correcciones de los puntos observados en la predefensa

Fuente: Elaboración propia

– **Delimitación espacial**

El área temática predominante en el tema, es la mecánica de suelos. La base de operaciones es el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho aplicada a la estabilización de suelos finos combinándolos con Bischofita.

1.4.3 Formulación del problema

¿De qué manera influye la adición de Bischofita en las propiedades mecánicas de los suelos finos, específicamente en su capacidad de soporte (CBR) (California Bearing Ratio)?

1.5 Objetivo general

Estabilizar subrasantes compuestas de suelo fino; considerando la adición gradual de Bischofita; de tal manera, se compruebe su mejoramiento en pruebas de C.B.R. (California Bearing Ratio)

1.6 Objetivos específicos

- Identificar subrasantes naturales para la extracción de las muestras.
- Caracterizar las muestras de suelos finos.
- Establecer los porcentajes de Bischofita a utilizarse en el proceso de la estabilización.
- Analizar la propiedad mecánica de las subrasantes estabilizadas con Bischofita
- Analizar estadísticamente los resultados obtenidos.

1.7 Formulación de la hipótesis

La adición de Bischofita mejora el C.B.R. de las subrasantes con suelo fino.}

1.8 Definición de variables

1.8.1 Variable independiente

Porcentajes de Bischofita

1.8.2 Variable dependiente

Propiedad mecánica del suelo (CBR)

1.8.3 Conceptualización y operacionalización de variables

Tabla 1.2: Operacionalización de variable dependiente

Variable dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Capacidad de soporte CBR	Verificación del desempeño de la combinación suelo-Bischofita, con especificaciones para suelos de subrasante.	% Bischofita	Porcentaje [%]	Porcentaje definido por el investigador
		Compactación	Porcentaje [%]	Contenido de humedad
			[g/cm ³]	T-180
		Curado	Días	Saturado - sumergido
		Corrimiento	[mm]	Deformación
			[kg/cm ²]	Pistón penetración

Fuente: Elaboración propia

1.9 Alcance

La investigación tiene como objetivo principal evaluar la efectividad de la Bischofita como estabilizador químico para suelos limo-arcillosos de subrasante en caminos no pavimentados, analizando sus efectos sobre propiedades mecánicas como el índice de soporte de California (CBR), para determinar su viabilidad como solución de estabilización en proyectos de infraestructura vial.

Esta investigación busca ofrecer una alternativa local y económica para la estabilización de suelos en Tarija, Bolivia, aprovechando la disponibilidad de Bischofita en el país, en particular, del salar de Uyuni. La Bischofita se emplea para mejorar la cohesión, resistencia y capacidad de soporte de los suelos finos, reduciendo así los problemas de deformación y falta de estabilidad que suelen presentar estos materiales, especialmente en condiciones de humedad.

CAPÍTULO II
ESTADO DE
CONOCIMIENTO

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 Marco conceptual

Figura 2.1: Camino no pavimentado



Fuente: Elaboración propia

Un camino no pavimentado, también conocido como camino de tierra o camino sin pavimentar, es un tipo de infraestructura vial en Ingeniería Civil que se caracteriza por carecer de una superficie de rodadura pavimentada.

Algunas características clave de los caminos no pavimentados incluyen:

- Superficie de rodadura: Estos caminos carecen de un revestimiento de asfalto, concreto u otros materiales duros. En su lugar, tienen una superficie de tierra, grava, o una mezcla de ambos.
- Mantenimiento: Los caminos no pavimentados requieren un mantenimiento regular, como relleno de baches, nivelación de la superficie y tratamiento de polvo. Esto se debe a que la superficie es más susceptible al desgaste y deterioro por condiciones climáticas y el tráfico.
- Usos típicos: Estos caminos suelen utilizarse en áreas rurales, zonas remotas o de baja densidad de tráfico, donde los costos de construcción y mantenimiento de

carreteras pavimentadas serían demasiado altos. También se emplean temporalmente durante la construcción de proyectos.

- Ventajas: Los caminos no pavimentados tienen un costo de construcción y mantenimiento generalmente más bajo que los pavimentados. Además, pueden ser más flexibles y adaptables a la topografía del terreno.
- Desventajas: Presentan una superficie menos uniforme y estable, lo que puede dificultar la circulación y aumentar el desgaste de los vehículos. También pueden generar más polvo y ser más susceptibles a erosión y deterioro por condiciones climáticas.

Los caminos a nivel de afirmado tienden a deteriorarse de forma más rápida bajo la acción del tránsito y los efectos ambientales, requieren de periódicas intervenciones para conservar la superficie de rodadura en condiciones óptimas, aludiendo elevados costos de mantenimiento. **Chavarry, Figueroa y Reynaga (2020).**

2.1.1 Suelo

En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas.

El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales. Por eso, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga, y otras más. **Braja M. Das 2016**

Para poder definir el comportamiento del suelo ante la obra que en él incide se consideran tres grupos de parámetros, que son:

- a) Los parámetros de identificación: La granulometría (distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado) y la plasticidad (la variación de consistencia del agregado en función del contenido en agua).

- b) Los parámetros de estado: La humedad (contenido en agua del agregado), y la densidad, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes.
- c) Los parámetros estrictamente geomecánicos: La resistencia al esfuerzo cortante, la deformabilidad o la permeabilidad. **Aguirre Ana (2020).**

2.1.2 Suelos finos

Son posiblemente el material más problemático en Ingeniería Civil, Geotecnia e Ingeniería Geológica, 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. Las arcillas son aquellas partículas con un valor inferior a 2 micras, y se caracterizan por la capacidad de aumentar su volumen cuando absorben agua, o retracción que es la disminución de su volumen cuando b
aja la humedad.

El cambio de volumen en los suelos finos, no es uniforme y no es constante, además responden a las condiciones físicas, ambientales y esfuerzos que muchas veces no se puede predecir. Sin embargo, los problemas más comunes que causan en obras de Ingeniería Civil son:

- Generación de grietas en varias direcciones debido al asentamiento (retracción) o expansión.
- Deformación y rotura de los elementos de cimentación.
- La expansividad y retracción del suelo es característico en suelos del tipo limo-arcilloso y es controlada por la variación de humedad en el suelo.
- La propiedad principal de los suelos finos como la arcilla es la plasticidad en su menor o mayor valor, según sea el intercambio de cationes. Los limos pueden llegar a tener la fineza de grano de arcillas, pero tienen muy poca plasticidad. Otra propiedad física de las arcillas es que su resistencia aumenta gradualmente a medida que aumenta la consistencia de estas.

2.1.3 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. **Crespo Villalaz (2017)**

2.1.4 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. **Crespo Villalaz (2017)**

Propiedades físico-mecánicas de los suelos finos

Las propiedades de los suelos finos son cruciales para entender su comportamiento cuando se utilizan como subrasantes en caminos no pavimentados. Entre las propiedades más importantes se encuentran:

- **Resistencia a la compresión:** Los suelos finos tienen una baja resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión uniaxial de un suelo es la cantidad máxima de carga que puede soportar antes de que se produzca una deformación. Sin tratamiento, los suelos finos no son capaces de soportar las cargas vehiculares, lo que genera deformaciones como hundimientos **Braja M. Das 2016**.
- **Plasticidad:** La plasticidad es la capacidad del suelo de deformarse sin romperse cuando se somete a una fuerza. Los suelos finos, en particular la arcilla, tienen un

alto índice de plasticidad, lo que los hace propensos a hincharse cuando absorben agua y a contraerse cuando se secan, generando problemas en las subrasantes, como grietas y baches **Budhu, 2015**.

- **Cohesión:** La cohesión es la capacidad de las partículas del suelo de mantenerse juntas. En los suelos finos, la arcilla tiene una alta cohesión debido a las fuerzas electrostáticas entre sus partículas, mientras que el limo tiene una cohesión baja, lo que lo hace más susceptible a la erosión **Terzaghi, Peck & Mesri, 1996**.
- **Permeabilidad:** La permeabilidad se refiere a la capacidad del suelo para permitir el paso de agua a través de él. Los suelos finos tienen baja permeabilidad, lo que significa que el agua se infiltra lentamente. Esto puede causar problemas de acumulación de agua en la superficie y contribuir a la saturación del suelo, debilitando su estructura **Bowles, 1996**.
- **Capacidad de soporte (CBR):** El índice **CBR (California Bearing Ratio)** mide la capacidad de un suelo para soportar cargas en relación con un suelo estándar. Los suelos finos tienen un bajo CBR, lo que significa que no pueden soportar adecuadamente el peso del tráfico vehicular sin estabilización **Braja M. Das 2016**.

2.1.5 Diferencias entre las arcillas y los limos

Tabla 2.1: 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	Plasticidad. Los rollitos para el límite plástico son frágiles. Secan rápido y se agrietan fácilmente con humedad bajo

el estado plástico. Tienen resistencia alta a muy alta.	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)

2.1.6 Características de los suelos finos no estabilizados

Baja resistencia a la compresión

- Los suelos arcillosos y limosos presentan una baja resistencia a la compresión, lo que significa que se deforman fácilmente bajo cargas pesadas, como el tráfico vehicular. Esto los hace inadecuados para ser utilizados en subrasantes sin estabilización **Braja M. Das 2016**

Alta plasticidad (arcilla)

- Los suelos arcillosos tienen un alto **índice de plasticidad**, lo que los hace susceptibles a expandirse y contraerse con los cambios en el contenido de humedad. Esta expansión y contracción puede generar problemas estructurales en los caminos, como grietas y baches **Budhu, 2015**.

Baja cohesión

- Tanto la arcilla como el limo tienen una baja cohesión, especialmente cuando están húmedos. Esto los hace vulnerables a la erosión, especialmente bajo condiciones de tráfico constante o cuando están expuestos a la intemperie **Terzaghi, Peck & Mesri, 1996**

Baja capacidad de soporte (CBR)

- Los suelos finos, como la arcilla y el limo, tienen un bajo índice CBR (California Bearing Ratio), lo que significa que no pueden soportar cargas vehiculares pesadas sin deformarse. Esto los hace inadecuados para el uso en subrasantes sin algún tipo de tratamiento estabilizador **Bowles, 1996**.

Alta retención de humedad

- Los suelos finos, especialmente la arcilla, retienen grandes cantidades de agua, lo que puede hacer que el suelo se sature rápidamente bajo condiciones de lluvia. La retención de agua reduce la resistencia del suelo y puede llevar a la formación de charcos y baches **Buhler & Cerato, 2007**.

Susceptibilidad a la erosión

- Los suelos limosos son altamente susceptibles a la erosión, tanto por el viento como por el agua. En áreas donde no hay vegetación o protección superficial, los suelos limosos pueden ser arrastrados fácilmente, lo que genera la pérdida de material en las subrasantes **MacDonald, 2014**.

Emisión de polvo

- Los suelos finos, cuando están secos, son propensos a emitir polvo en condiciones de viento o tráfico vehicular. Esto es particularmente problemático en zonas rurales con caminos no pavimentados, donde la emisión de polvo puede reducir la visibilidad y afectar la calidad del aire **Budhu, 2015**.

Alta expansividad (arcilla)

- Los suelos arcillosos son altamente expansivos, lo que significa que se hinchan cuando absorben agua y se contraen cuando se secan. Esto puede generar levantamientos y grietas en los caminos no pavimentados, afectando su durabilidad y estabilidad **Braja M. Das 2016**.

Baja permeabilidad

- La arcilla tiene una **baja permeabilidad**, lo que significa que el agua se infiltra lentamente en el suelo. Esto puede causar problemas de drenaje en los caminos no pavimentados, acumulando agua en la superficie y afectando la durabilidad del camino **Terzaghi, Peck & Mesri, 1996**.

Susceptibilidad al hinchamiento y contracción

- Los suelos arcillosos son altamente susceptibles a hincharse cuando absorben agua y a contraerse cuando se secan. Este comportamiento puede generar deformaciones en los caminos, como grietas y baches, debido a los cambios volumétricos **Bowles, 1996**.

2.1.7 Subrasantes

La subrasante es la capa de suelo natural o compactado que sirve de base para las capas superiores de un pavimento, en este caso para caminos no pavimentados. Es la primera capa que soporta las cargas de tráfico y se encuentra inmediatamente debajo de la estructura del camino, por lo que su resistencia y estabilidad son cruciales para la durabilidad y buen funcionamiento de la infraestructura vial **Braja M. Das 2016**.

2.1.7.1 Características de las subrasantes en carreteras

- Soporte de Cargas: Distribuyen las cargas del tráfico y evitan deformaciones excesivas.
- Tipo de Suelo: Pueden estar compuestas de diferentes tipos de suelos, como arcillas, limos o arenas, cada uno con propiedades específicas que afectan el comportamiento de la carretera.

2.1.7.2 Propiedades mecánicas

Es fundamental evaluar la capacidad de carga, la compactación y el drenaje del suelo para asegurar su idoneidad.

Importancia en el diseño de carreteras:

- Estabilidad: Una subrasante adecuada previene problemas como hundimientos o fallos en la superficie de la carretera.
- Durabilidad: Las subrasantes influyen en la vida útil del pavimento; un mal diseño puede resultar en reparaciones frecuentes.
- Drenaje Eficiente: Un diseño adecuado de la subrasante ayuda a controlar el agua, evitando daños por humedad.

Las subrasantes son fundamentales en el diseño y construcción de carreteras, ya que garantizan la estabilidad y durabilidad de la infraestructura vial. Un análisis adecuado y un tratamiento efectivo son esenciales para el éxito de los proyectos viales

Chuquillanqui, Q., & Lee, W. J. (2020).

2.1.8 Requisitos para una subrasante

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

Tabla 2.2: Especificaciones técnicas para una subrasante

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

Fuente: INVÍAS (2012)

2.1.9 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).

2.1.9.1 Beneficios de la estabilización de suelos.

La estabilización de suelos sirve para modificar las propiedades geotécnicas del mismo y hacerlo apto para el trabajo en obra. La función de la estabilización es:

- Disminuir los asentamientos de estructuras.
- Disminuir el potencial de expansión y contracción de los suelos.
- Aumentar la resistencia de los suelos.
- Facilitar la manejabilidad de los suelos.
- Reducir la permeabilidad de ciertos suelos.
- Reducir el índice de plasticidad.

2.1.10 Tipos de estabilización de suelos.

Las técnicas de estabilización de suelos pueden clasificarse en dos grandes grupos: estabilización mecánica y estabilización química. Ambos métodos son utilizados para mejorar las propiedades del suelo, dependiendo del tipo de suelo y del resultado que se desea obtener.

2.1.10.1 Estabilización mecánica.

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.

Esta técnica se centra en mejorar la densidad del suelo y su capacidad de soporte mediante la reducción del espacio entre las partículas del suelo. **Braja M. Das 2016**

- **Compactación:** La compactación es una técnica común en la estabilización mecánica. Consiste en aplicar energía al suelo para reducir el volumen de aire presente en los vacíos del mismo, lo que incrementa la densidad y mejora su

resistencia a la compresión. El proceso de compactación se lleva a cabo utilizando rodillos, vibradores o pisonés mecánicos, y es especialmente efectivo en suelos arenosos o limosos que no tienen una cohesión natural alta (Bowles, 1996).

- **Mezcla de Suelos:** La mezcla de diferentes tipos de suelos, como suelos arenosos con suelos arcillosos, también es una técnica de estabilización mecánica. La combinación de suelos con diferentes características mejora la cohesión y la capacidad de carga de la subrasante. Sin embargo, este método puede no ser suficiente para mejorar significativamente suelos muy problemáticos como la arcilla expansiva, por lo que generalmente se combina con técnicas de estabilización química **Braja M. Das 2016.**

2.1.10.2 Estabilización química.

La estabilización química de suelos se basa en la aplicación de un producto químico, el cual se debe mezclarse homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo las especificaciones técnicas. La finalidad de este tipo de estabilización es transferir al suelo tratado, ciertas propiedades que mejore sus propiedades de comportamiento ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio. (Llerena, 2015).

En general el uso de estabilizadores químicos para reducir las tasas de deterioro y aumentar la estabilidad logrando como consecuencia la reducción de las emisiones de polvo (Crespo, 2000).

Normalmente la estabilización química se realiza con cal o cemento, pero también existen otras técnicas como ser:

- **Productos asfálticos:** Es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- **Cloruro de sodio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, en especial para arcillas y limos.
- **Cloruro de calcio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, en especial para arcillas y limos.
- **Escorias de fundición:** Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

- Polímeros: Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Hule de neumáticos: Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

2.1.11 Ventajas de la estabilización química en caminos no pavimentados

El uso de estabilizadores químicos en caminos no pavimentados presenta múltiples ventajas en comparación con la estabilización mecánica o la simple compactación de suelos:

- **Incremento de la resistencia a la compresión:** Los estabilizadores químicos como la Bischofita o la cal incrementan significativamente la resistencia a la compresión del suelo, permitiendo que las subrasantes soporten cargas más pesadas sin deformarse **Terzaghi, Peck & Mesri, 1996**.
- **Reducción de la plasticidad:** La adición de estabilizadores químicos reduce el índice de plasticidad del suelo, lo que disminuye su tendencia a expandirse y contraerse con los cambios de humedad. Esto es crucial para evitar deformaciones en suelos arcillosos.
- **Mejora en la capacidad de soporte (CBR):** La estabilización química mejora el índice CBR de la subrasante, lo que aumenta su capacidad de soportar el tráfico vehicular sin degradarse **Bowles, 1996**.
- **Control del polvo:** En climas secos, el polvo puede ser un problema importante en caminos no pavimentados. La Bischofita, en particular, ayuda a controlar la emisión de polvo al retener la humedad en el suelo **MacDonald, 2014**.
- **Reducción de la erosión:** La mejora en la cohesión del suelo estabilizado reduce la erosión, lo que es esencial para mantener la integridad de las subrasantes en climas húmedos o zonas con fuerte exposición al viento.

2.1.12 Estabilización de suelos con Bischofita

2.1.13 Descripción de la Bischofita

Figura 2.2: Bischofita



Fuente: Ficha técnica Bischofita

La Bischofita (cloruro de magnesio hexahidratado), es una sal cuya fórmula química es $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, y tiene la forma de cristales de color blanco, además es conocido como Bischofita, es utilizada como estabilizador químico de suelos ya que reduce el deterioro superficial de las carpetas granulares de rodado, además también controla la emisión de polvo. (Gutiérrez, 2010).

Esta sal, es un compuesto químico natural que facilita la captación y retención de agua en zonas semidesérticas, y su composición se presenta a continuación:

Figura 2.3: Ficha técnica

	FICHA TÉCNICA BISCHOFITA-C	YLB-Mg-FTP-01
		Versión: 2
		Página 1 de 1

BISCHOFITA ó CLORURO DE MAGNESIO HEXAHIDRATADO (MgCl₂*6H₂O)					
<p>El Cloruro de Magnesio Hexahidratado es una sal cuya fórmula química es MgCl₂·6H₂O, tiene la forma de cristales de color blanco y sin olor. También recibe el nombre de Bischofita. Es producido en forma 100% natural a partir de salmueras ricas en magnesio existentes en el salar de Uyuni por parte de PLANTA DE PRODUCCION DE SALES cuya composición química es Cloruro de Magnesio hexahidratado (MgCl₂*6H₂O), es utilizada como estabilizador químico de suelos ya que reduce el deterioro superficial de las carpetas granulares de rodado, como también controla la emisión de polvo.</p>					
CARACTERISTICAS FÍSICO QUÍMICAS					
Datos Técnicos Básicos					
Nombre Químico	Cloruro de Magnesio Hexahidratado				
Nombre Comercial	Bischofita				
Almacenamiento	Conservados en acopios expuesto al medio ambiente.				
Tipo de Entrega	A granel/ sin Precinto de Seguridad				
Concentración de Bischofita	Densidad Aparente	Humedad			
80,00 – 92,00 % (gr/100gr)	0,88 - 0,92 (kg/m ³)	1,00 - 2,00			
pH (a solución Saturada)	Solubilidad	Densidad			
4,00 - 7,00	90gr/100gr	1,23-1,26 gr/cc			
Composición Química					
Componentes Principales		Componentes Menores			
Magnesio	Mg	9,50 – 11,0 %	Litio	Li	0,86 – 1,10 %
Cloruros	Cl	28,00 – 31,00 %	Potasio	K	0,20 – 0,50 %
Hidratos	6H ₂ O	50,00 – 55,00%	Sodio	Na	0,45 – 0,90 %
Los Hidratos son agua (H ₂ O) de cristalización de la Bischofita.			Sulfato	SO ₄	4,50 – 8,50 %
Características Organolépticas					
Color		Blanco			
Sabor		Amargo			
Olor		Inodoro			
Aspecto		Cristales incoloros			
Usos Identificados					
El producto es aplicable a cualquier superficie expuesta a tránsito vehicular, peatonal, animales y acciones climáticas de viento que generan desprendimiento de material fino.					
Lugar de Elaboración Identificación de la Empresa					
Sub producto obtenido en la planta producción de sales de Yacimientos de Litos Bolivianos Salar de Uyuni – Potosí					

Teléfono Piloto 214511 – 2145725 • Fax (591-2)2145711 Int. 2050 – 2060
 Av. Mariscal Santa Cruz, Edif. Hansa, piso 19 • La Paz – Bolivia
 www.ylb.gob.bo

Fuente: Y.L.B.

Tabla 2.3: Composición química

Componentes principales	
Cloro	29-32.8%
Magnesio	10-12.8%
Agua	50-55%
Componentes menores	
Sodio	0.5-2.5%
Sulfato	0.0-2.0%
Potasio	0.3-3.8%
Litio'	0.2-1.1%

Fuente: Gutiérrez, (2010).

2.1.14 Propiedades de la Bischofita

Por ser un producto natural el cloruro de magnesio hexahidratado mejora las propiedades y cualidades del suelo a diferencia de otros estabilizadores químicos. A continuación, se describen sus propiedades más importantes:

Composición química

- La Bischofita está formada por un alto contenido de cloruro de magnesio y se encuentra en estado cristalino. Su fórmula química es $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, lo que indica que está compuesta de cloruro de magnesio y agua en una proporción de 6 moléculas de agua por cada molécula de cloruro de magnesio.
- Tiene una gran capacidad higroscópica, lo que significa que puede atraer y retener agua del ambiente, ayudando a mantener el suelo húmedo **MacDonald, 2014**.

Higroscopicidad

- La Bischofita es altamente higroscópica, lo que significa que puede absorber la humedad del aire y mantener los suelos estabilizados ligeramente húmedos. Esta propiedad es clave para el control del polvo en caminos no pavimentados, ya que la retención de agua ayuda a reducir la emisión de polvo. **Buhler & Cerato, 2007**

Solubilidad en agua

- La Bischofita es altamente soluble en agua, lo que puede ser una ventaja o una desventaja dependiendo del entorno. En climas secos, su solubilidad permite una rápida integración en el suelo, mejorando su estabilización. Sin embargo, en áreas con mucha precipitación, esta solubilidad puede llevar a la lixiviación (desgaste), lo que reduce su efectividad a largo plazo.
- Su solubilidad en agua a 20°C es de aproximadamente 167 g por cada 100 ml de agua **Budhu, 2015**.

Densidad

- La Bischofita tiene una densidad de alrededor de 1.56 g/cm³, lo que la hace un mineral relativamente liviano en comparación con otros estabilizadores de suelos como el cemento o la cal.

Propiedades mecánicas

- Cuando se mezcla con suelos finos como arcilla o limo, la Bischofita mejora su resistencia a la compresión y su capacidad para soportar cargas pesadas. Esto se debe a su capacidad de unirse con las partículas del suelo, mejorando la cohesión y la compactación del suelo.
- Reduce el índice de plasticidad de los suelos finos, lo que significa que el suelo se vuelve menos propenso a expandirse o contraerse con los cambios de humedad, lo que mejora la estabilidad estructural de los caminos.

Control de polvo

- La capacidad de la Bischofita para mantener los suelos húmedos a través de su absorción de agua la convierte en un excelente agente para el control de polvo en caminos no pavimentados. Esta propiedad es especialmente útil en climas secos o áreas con tráfico constante, donde el polvo puede ser un problema importante.

Estabilidad química

- La Bischofita es químicamente estable en condiciones normales, pero en ambientes muy húmedos puede lixiviarse fácilmente. Esto implica que, para mantener su efectividad, puede requerir reaplicaciones periódicas en zonas donde la lluvia o el riego son frecuentes.

Efecto en la erosión del suelo

- Al mejorar la cohesión del suelo, la Bischofita también ayuda a reducir la erosión superficial causada por el viento o el agua, lo que es especialmente útil en suelos limosos o arenas finas.

Corrosión

- Una desventaja de la Bischofita es su alto contenido de cloruros, que puede causar corrosión en metales cercanos, como puentes, alcantarillas o vehículos que circulan frecuentemente por caminos estabilizados con Bischofita. Por lo tanto, es importante considerar este factor en su aplicación cerca de infraestructuras metálicas.

Aplicaciones en la construcción de caminos

- En la estabilización de suelos para subrasantes, la Bischofita se utiliza para mejorar la resistencia a la compresión, reducir la plasticidad y controlar la emisión de polvo, siendo especialmente efectiva en caminos rurales no pavimentados o con poco mantenimiento.

Mejoras en la capacidad de carga (CBR)

- Uno de los principales beneficios de usar Bischofita es el aumento del **índice CBR** (California Bearing Ratio), lo que mejora la capacidad del suelo para soportar tráfico sin deformarse. **Gutiérrez (2010)**

2.1.15 Aplicaciones de la Bischofita

La principal aplicación de la Bischofita es el uso que se le da como estabilizador de caminos no pavimentados; razón por la cual y basado en la experiencia acumulada a la fecha, RoadMag permite estabilizar casi cualquier tipo de suelo. Sin embargo, se obtiene un mejor desempeño del producto con suelos que poseen estabilidad mecánica (CBR > 50– 60% saturado o no sumergido según requerimientos de proyecto), además de cumplir ciertos requerimientos de granulometría y plasticidad.

Otro uso que se le da a la Bischofita es la de supresor de polvo en caminos no pavimentados principalmente en las carreteras a nivel de afirmado, aunque también puede ser aplicada en grandes extensiones de tierra, tales como estacionamientos, canchas de

acopio y otros. RoadMag suprime el polvo manteniendo húmeda la superficie del camino, esto se debe a que es una sustancia muy higroscópica, es decir, tiene la habilidad de absorber la humedad del ambiente. En zonas con suficiente humedad, RoadMag absorbe y retiene el agua de la atmósfera y suelo circundante para controlar efectivamente el polvo liberado de la superficie de rodado.

2.1.16 Dosis de Bischofita.

Tabla 2.4: Dosis de Bischofita

IP	Dosis de Bischofita (%)
NP-3	4 - 5
4-8	3 – 5
9 - 15	3 - 4

Fuente: Gutiérrez (2010)

La dosis de Bischofita depende de las propiedades plásticas y contenido de finos del suelo. De acuerdo a los ensayos de laboratorio de resistencia a la CNC, la dosis óptima de Bischofita para la mayoría de los suelos estudiados debería ser 3 a 5%. Por otro lado, los resultados de terreno muestran una tendencia a que suelos no plásticos se comportan bien con dosis de Bischofita cercanas al 5%, independiente del porcentaje de finos del suelo. Los suelos más plásticos se mantienen mejor con dosis de Bischofita cercanas al 3%. En éstos se aprecia una tendencia a que con mayor contenido de finos se requieren dosis más bajas de Bischofita. Este hecho es debido a que suelos más plásticos poseen la cohesión necesaria para mantener la capa de rodado estable en climas áridos. En este caso, el uso de la Bischofita permite mantener la superficie húmeda, de tal manera que se reduce la tasa de deterioro del camino. No se encontró una relación clara entre porcentaje de finos y dosis de Bischofita para suelos plásticos, por ello, la Tabla muestra las dosis de Bischofita recomendadas solamente de acuerdo al índice de plasticidad del suelo.

2.1.17 Propiedades de los suelos tratados con Bischofita.

Este aditivo mejora la estabilidad del suelo en:

Resistencia a la compresión: La Bischofita incrementa la resistencia a la compresión no confinada en suelos arcillosos y limosos. La adición de cloruro de magnesio ayuda a mejorar la cohesión entre partículas de suelo, lo que a su vez incrementa la resistencia mecánica general del suelo.

Índice de CBR: Se ha demostrado que el uso de Bischofita en suelos arcillosos y limosos puede mejorar el índice de CBR, que es una medida de la capacidad de carga del suelo. Esto hace que estos suelos sean más aptos para el uso en subrasantes de carreteras y caminos no pavimentados **Das, B. M. (2010)**.

Efecto en la cohesión del suelo

- **Arcilla:** En suelos arcillosos, la Bischofita aumenta la cohesión entre las partículas del suelo, mejorando su capacidad para resistir fuerzas externas. Este aumento de la cohesión ayuda a reducir la deformación del suelo bajo cargas de tráfico, lo cual es importante para mejorar la durabilidad de las subrasantes en caminos no pavimentados.
- **Limo:** Aunque los suelos limosos no son tan cohesivos como los arcillosos, la Bischofita puede mejorar la estabilidad de estos suelos, ayudando a unir las partículas y aumentando ligeramente la cohesión.

Reducción de la plasticidad

- **Arcilla:** Los suelos arcillosos son conocidos por su alta plasticidad, lo que significa que se expanden y contraen significativamente con cambios en el contenido de humedad. La Bischofita reduce el índice de plasticidad de la arcilla, lo que disminuye su capacidad de cambiar de volumen, reduciendo así los problemas de expansión y contracción.
- **Limo:** Los suelos limosos tienen una plasticidad menor que la arcilla, pero pueden ser susceptibles a la erosión en condiciones húmedas. La Bischofita puede ayudar a reducir esta susceptibilidad al mejorar la resistencia del suelo a la humedad.

Cohesión entre partículas

- **Arcilla:** La Bischofita incrementa la **cohesión** entre las partículas del suelo arcilloso, lo que aumenta su capacidad para resistir cargas y fuerzas cortantes. Esto es clave para mejorar la resistencia de las subrasantes frente a deformaciones, especialmente bajo condiciones de tráfico pesado.
- **Limo:** En suelos limosos, la Bischofita también mejora la cohesión, lo que ayuda a prevenir la erosión y a mantener la integridad estructural del suelo en la subrasante.

Modificación de la permeabilidad

- **Arcilla:** Los suelos arcillosos tienen una baja permeabilidad debido a su estructura fina y compacta. La Bischofita no afecta significativamente esta baja permeabilidad, pero al reducir la plasticidad y mejorar la cohesión, puede mejorar la **estabilidad estructural** del suelo en presencia de agua.
- **Limo:** En suelos limosos, que suelen tener una mayor permeabilidad que las arcillas, la Bischofita puede ayudar a reducir la erosión al mejorar la estructura del suelo y reducir el desplazamiento de partículas en presencia de agua.

Reducción de la expansividad

- **Arcilla:** La Bischofita ayuda a reducir el comportamiento expansivo de los suelos arcillosos al controlar el contenido de humedad. Esto es crucial para evitar problemas de levantamiento en suelos arcillosos que tienden a expandirse en condiciones húmedas.
- **Limo:** Los suelos limosos generalmente no tienen el problema de expansión tan marcado como los suelos arcillosos, pero la Bischofita puede ayudar a estabilizar su comportamiento frente a cambios de humedad **Bach Grimaldo 2019.**

2.1.18 Granulometría (AASHTO T88)

Figura 2.4: Juego de tamices estandarizados



Fuente: Elaboración propia

En cualquier masa de suelo los tamaños de los granos varían considerablemente, por lo cual, para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica, esta distribución puede obtenerse mediante análisis granulométrico por mallas o con el hidrómetro en el caso de partículas finas. Los límites de tamaño de las partículas que constituyen un suelo ofrecen un criterio obvio para una clasificación descriptiva del mismo. **Ana Shirley Oña Valdez, (2019)**

Tabla 2.5: 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 2016

2.1.19 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico.

Con ellos, es posible clasificar el suelo en la Clasificación Unificada de Suelos (Unified Soil Classification System, SUSCS).

2.1.20 Límite líquido (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 o copa de Casagrande, y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, Ese cierre en una longitud de 12.7 mm (1/2"). Si el número de golpes para que se cierre el surco es 25, la humedad del suelo (razón peso de agua/peso de suelo seco) corresponde al límite líquido **Ana Shirley Oña Valdez, 2019.**

2.1.21 Límite plástico (AASHTO T90)

Para medir la plasticidad de las arcillas y limos se han desarrollado varios criterios de los cuales se menciona el desarrollado por Atterberg, el cual dijo en primer lugar que la plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. **Ana Oña Valdez, 2019.**

2.1.22 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.**

$$IP = LL - LP$$

2.1.23 Compactación (ASSHTO T272).

Figura 2.5: Compactación



Fuente: Elaboración propia

La compactación de los suelos es importante como medio para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de estos

En la prueba Proctor, el suelo se compacta en un molde que tiene un volumen de 943.3 cm³. El diámetro del molde es 101.6 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.

Braja M. Das 2015.

Objetivo de la Compactación:

- Mejorar las propiedades mecánicas del suelo.
- Generar a partir de un suelo un material con las propiedades mecánicas apropiadas.
- El proceso de la compactación es la densificación rápida de un suelo, sin pérdida de humedad

La proporción que existe entre la densidad seca de un suelo (su grado de compactación) y su contenido de humedad es de gran utilidad en la compactación de suelos. Su regulación se realiza mediante el ensayo Proctor ya sea modificado o normal. La diferencia entre las dos variantes (Proctor normal y Proctor modificado) radica en la energía de compactación empleada, el cual es de 4.5 veces superior en el segundo caso que en el primero.

El acomodo de las partículas, en un suelo que se ha tratado de mejorar, dependen además de los materiales para su compactación de la humedad que tenía en ese momento el material, pues si las partículas están secas, las fricciones intergranular oponen una resistencia mayor al desplazamiento relativo de ellas, que si se encuentran lubricadas por una película de agua; mientras que, si la masa tiene una humedad elevada, el agua llena los vacíos que podrían ser ocupados por partículas en un arreglo más denso. Por lo tanto, existe un contenido de agua con el que se obtiene el máximo peso volumétrico.

Para obtener una buena compactación debe controlarse la cantidad de agua, pues si es muy poca, no existirá lubricación y no se podrá disminuir la fricción entre las partículas.

Roldán de Paz, 2010.

2.1.24 Relación de soporte del suelo CBR (AASHTO T193)

Figura 2.6: Ensayo de CBR



Fuente: Elaboración propia

El objetivo del ensayo de CBR es establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente utilizados como bases y sub. rasantes bajo el pavimento de carreteras y aeropistas, determinando la relación entre el valor de CBR y la densidad seca que se alcanza en el campo.

El ensayo C.B.R. se emplea para evaluar la capacidad portante de terrenos compactados como terraplenes, capas de firme, subrasantes, explanadas, así como en la clasificación de terrenos.

Las siglas C.B.R. significan California Bearing Ratio y proviene que este ensayo fue desarrollado, antes de la segunda guerra mundial, por el departamento de transportes de California.

La prueba C.B.R. de suelos consiste básicamente en compactar un terreno en unos moldes normalizados, sumergirlos en agua y aplicar un punzonamiento sobre la superficie del terreno mediante un pistón normalizado.

Tabla 2.6: Clasificación y uso del suelo según el valor de C.B.R.

C.B.R.	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2-5	Muy mala	Sub – rasante
5-8	Mala	Sub – rasante
8-20	Regular – buena	Sub – rasante
20-30	Excelente	Sub – rasante
30-60	Buena	Sub – base
60-80	Buena	Base
80-100	Excelente	Base

Fuente: Assis A. 1988

2.1.25 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 American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Braja M Das 2015.

2.1.26 Sistema de clasificación AASHTO

Este sistema de clasificación de suelos fue desarrollado en 1929 como el Sistema de Clasificación de Administración de Carreteras. Ha sido objeto de varias revisiones, con la actual versión propuesta por la Comisión de Clasificación de Materiales para los Tipos de Carreteras Sub rasantes y Granulares de la Junta de Investigación de Carreteras en 1945 (Norma ASTM D-3282; método AASHTO M145). **Braja, M Das 2015.**

De acuerdo con este sistema el suelo se clasifica en siete grupos principales: A-1 a A-7. Los suelos que clasifican en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz núm. 200. Los suelos donde más de 35% pasa a través del tamiz núm. 200 se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Éstos son: **Braja M Das 2015**.

2.1.27 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, 2016**.

Tabla 2.7: 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 (2016)

2.1.28 Estadística

La estadística desempeña un papel fundamental en la realización de comparaciones, ya que proporciona herramientas y técnicas para resumir datos, realizar análisis comparativos, basar decisiones en evidencia sólida, controlar variables y generalizar resultados.

2.1.29 Media

La media es ampliamente utilizada en estadística debido a su simplicidad y capacidad para proporcionar una medida representativa del conjunto de datos, siendo está el promedio numérico de un conjunto de datos (Murray & Larry, 2009).

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

Donde:

x_i = Datos

n = Número de datos

2.1.30 Desviación estándar

La desviación estándar es una medida estadística que cuantifica la dispersión o variabilidad de un conjunto de datos con respecto a su media. Es útil para comprender la dispersión de los valores individuales y evaluar la consistencia o variabilidad de los datos (Murray & Larry, 2009).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - a)^2}{N}}$$

Donde:

a = Es un promedio cualquiera además de la media aritmética

X_j = Datos.

N = Número de datos.

De todas las desviaciones estándar, la mínima es aquella en la que $a = \bar{X}$

2.1.31 Coeficiente de variación

Si la dispersión absoluta es la desviación estándar s y el promedio es la media \bar{X} , entonces a la dispersión relativa se le llama coeficiente de variación o coeficiente de dispersión; este coeficiente se denota por CV (Murray & Larry, 2009)

$$\text{Coeficiente de variación (CV)} = \frac{S}{\bar{X}}$$

Siempre que $\bar{X} \neq 0$

Donde:

S = Desviación estándar.

\bar{X} = Media aritmética.

Esta medida es adimensional, por lo tanto, se convierte en un indicador efectivo para comparar dos o más variables distintas o dos o más poblaciones diferentes.

2.2 Marco referencial

En nuestro medio el material predominante es la arcilla, un tipo de suelo que, debido a sus cambios volumétricos y baja resistencia, hacen que la construcción de carreteras y cualquier construcción civil puedan sufrir contratiempos debido al comportamiento de este suelo en presencia del agua.

Se puede verificar en el estudio realizado por Ana S. Oña Valdez, (2019) análisis de la capacidad de soporte del suelo arcilloso mediante la adición de cloruro de calcio se centra en la adición de cloruro de calcio como método para mejorar las propiedades mecánicas de este tipo de suelo, caracterizado por su alta plasticidad y baja resistencia. A través de ensayos de laboratorio, se determinó que la incorporación de cloruro de calcio no solo

incrementa la resistencia del suelo, sino que también reduce su plasticidad, haciéndolo más adecuado para su uso como subrasante en la construcción de caminos. Los resultados evidencian que este tratamiento químico permite optimizar costos en proyectos de construcción, al evitar la necesidad de desalojo del material arcilloso, y promueve un uso más eficiente de los recursos locales, destacando su viabilidad como alternativa en la ingeniería civil.

La presente investigación la “Influencia del Cloruro de Magnesio Hexahidratado en las Propiedades de la Subrasante en Carreteras no Pavimentadas” analiza la influencia del cloruro de magnesio hexahidratado en las propiedades de la subrasante en carreteras no pavimentadas, el objetivo general fue: Evaluar la influencia del cloruro de magnesio hexahidratado en las propiedades de la subrasante en carreteras no pavimentadas y la hipótesis general que se contrastó fue: El cloruro de magnesio hexahidratado influye en las propiedades de la subrasante en carreteras no pavimentadas. Durante la ejecución de la investigación se ha notado la variación de las propiedades del suelo por el uso del cloruro de magnesio hexahidratado en las progresivas 339+100, 339+150 y 339+200 de la zona de estudio las cuales se muestra a continuación.

Por otro lado, el proyecto de investigación Bach. G. Cosiche Aguila (2019), Influencia del cloruro de magnesio hexahidratado en el California Bearing Ratio La propiedad más importante del suelo es según Bañón & Beviá (2000) el comportamiento mecánico del suelo, conseguir una mejor estabilidad mecánicas que ayuden a mitigar posibles surgimientos de asentamiento diferenciales en tal sentido uno de los métodos más usados con mayor frecuencia para caracterizar el suelo en función a su propiedad mecánica es el CBR. Thenoux & Vera (2002), propone de manera general que una dosificación buena de este material podrá estar entre del 3 % - 5 % de cloruro de magnesio hexahidratado.

De acuerdo a la tesis “Aplicación del cloruro de magnesio como alternativa natural para incrementar la estabilización del suelo de la carretera Juliaca – Caminaca, 2021”. Realizada en la Universidad Cesar Vallejo tiene por objetivo aplicar una nueva técnica de

estabilización de suelos para mejorar las propiedades físico mecánicas de la sub rasante de la carretera Juliaca – Caminaca.

Los resultados demostraron que el suelo natural evaluado contempla una CBR de 5.83%, máxima densidad seca 1.82 g/cm³ y una humedad óptima de 12.66%, así mismo se determinó que los valores de CBR para las dosificaciones 5%, 7% y 9% demostraron resultados de 12.73%, 14.00%, 12.93% respectivamente.

2.3 Marco normativo

Determinación en laboratorio del contenido de humedad del suelo ASTM D2216.

Análisis granulométrico por tamizado ASTM D422 AASTHO T88.

Análisis granulométrico por medio del hidrómetro ASTM D422.

Determinación del límite líquido de los suelos ASTM D4318 AASTHOCT89.

Determinación del límite plástico e índice de plasticidad ASTM D4318 AASHTO T90.

Determinación del peso específico de los suelos ASTM D854 AASHTO T100

Compactación (AASHTO T272).

Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio) ASTM D1883 AASHTO T193.

2.4 Análisis y posición del investigador

Los suelos finos como los limos y las arcillas, predominantes en Tarija, presentan desafíos significativos en su uso como subrasantes en caminos no pavimentados. Estos suelos son inestables, tienen baja resistencia y una alta susceptibilidad a cambios de humedad, lo que los hace propensos a deformarse y fallar bajo cargas vehiculares. Tradicionalmente, la solución ha sido remover y reemplazar estos suelos, un método costoso y poco viable en áreas rurales. La búsqueda de alternativas locales y económicas es esencial para reducir los costos de construcción y mantenimiento en estos entornos.

El uso de estabilizadores convencionales como la cal o el cemento ha mostrado buenos resultados en la mejora de las propiedades del suelo, pero su aplicación puede ser limitada debido al costo y la logística de transporte. La Bischofita, por otro lado, ofrece una alternativa, aprovechando un recurso accesible y abundante en Bolivia. Además, su alta higroscopicidad y solubilidad en agua permiten una aplicación práctica y efectiva en el suelo, facilitando su estabilización en condiciones semiáridas como las de Tarija.

CAPÍTULO III

DISEÑO

METODOLÓGICO Y

RELEVAMIENTO DE LA

INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Método de investigación.

En la presente investigación, se utilizó el método científico, como método general, dado que, este método de investigación sigue un conjunto de pasos ordenados que parte de la observación, planteamiento del problema, planteamiento de hipótesis, la experimentación y finalmente los resultados y conclusiones.

3.2 Diseño de investigación

El diseño de la investigación para la presente tesis fue experimental del tipo cuasi experimental, pues se manipulará las variables para compararlo con una muestra patrón.

3.2.1 Enfoque cuasiexperimental

El estudio tiene un enfoque cuasiexperimental, ya que no hay un control completo sobre todas las variables, dado que los suelos serán recolectados en ambientes naturales (subrasantes de caminos no pavimentados) donde no se pueden controlar las condiciones iniciales de la muestra.

Sin embargo, la aplicación de Bischofita y las pruebas de laboratorio se realizan en condiciones controladas, lo que permite aislar y evaluar el efecto de este estabilizador sobre las propiedades del suelo.

Este diseño permite:

- **Manipulación controlada de la variable independiente:** En este caso, la Bischofita se aplicará a las muestras de suelo en diferentes concentraciones, lo que permite evaluar cómo influye esta variable sobre las propiedades mecánicas del suelo.
- **Comparación de resultados:** Los suelos estabilizados con Bischofita serán comparados con muestras no tratadas, lo que permite determinar si hay diferencias significativas en su comportamiento mecánico.

3.3 Grupos experimentales y de control

El diseño experimental incluirá tanto grupos experimentales como grupos de control para comparar los resultados de los suelos tratados con Bischofita frente a los suelos sin tratamiento. Esto permitirá establecer la efectividad de la Bischofita en la estabilización de suelos finos.

a. Grupo de control

El grupo de control estará compuesto por muestras de suelo sin tratamiento con Bischofita. Estas muestras serán sometidas a las mismas pruebas de laboratorio (granulometría, límites de Atterberg y CBR) sin ninguna modificación química, lo que permitirá establecer una línea base de comparación.

b. Grupo experimental

El grupo experimental estará compuesto por muestras de suelo tratadas con diferentes concentraciones de Bischofita (1%, 3%, 5% y 7%). Cada grupo experimental será sometido a los mismos procedimientos de prueba que el grupo de control para evaluar cómo las concentraciones de Bischofita afectan las propiedades físicas y mecánicas del suelo.

3.4 Diseño metodológico

3.4.1 Unidad de muestra

La unidad de muestra se considera un ensayo de laboratorio de suelos.

3.4.2 Población

N= La población tomada en cuenta es de modo infinito, es decir que para la presente investigación se toma en cuenta todos los ensayos de laboratorio de suelos.

3.4.3 Muestra

n= Por calcular

Tabla 3.1: Muestra

		N° de ensayos	Ni
Zona de exploración	Zona 1	5	5
	Zona 2	5	5
Caracterización del suelo limoso	Contenido de humedad	5	5
	Granulometría	5	5
	Límites de Atterberg	10	10
Caracterización del suelo arcilloso	Contenido de humedad	10	10
	Granulometría	5	5
	Límites de Atterberg	10	10
Pruebas del proceso de estabilización	Compactación suelo limoso	15	15
	CBR suelo limoso	40	40
	Compactación suelo arcilloso	15	15
	CBR suelo arcilloso	40	40

165

Fuente: Elaboración propia

3.5 Tamaño de la muestra

Para el cálculo del tamaño de la muestra se tomará en cuenta la ecuación de muestreo estratificado:

Desarrollo:

Unidad de muestra: La prueba física y mecánica

Población: N = 165 pruebas físicas y mecánicas

Muestra: "n", por calcular

Variable a medir: La estabilidad del suelo al incorporarle Bischofita en pruebas físicas y mecánicas.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n Ni * \sigma^2}{\left(N * \left(\frac{e}{Z} \right)^2 \right) + \frac{\sum_{i=1}^n Ni * \sigma^2}{N}}$$

Tabla 3.2: Determinación del número de ensayos

		Ni	σ	Niσ	f̄i	ni	ni
Zona de exploración	Zona 1	5	0.10	0.50	0.030	3.0	4
	Zona 2	5	0.10	0.50	0.030	3.0	4
Caracterización del suelo limoso	Contenido de humedad	5	0.10	0.50	0.030	3.0	4
	Granulometría	5	0.10	0.50	0.030	3.0	4
	Límites de Atterberg	10	0.10	1.00	0.061	6.1	7
Caracterización del suelo arcilloso	Contenido de humedad	10	0.10	1.00	0.061	6.1	7
	Granulometría	5	0.10	0.50	0.030	3.0	4
	Límites de Atterberg	10	0.10	1.00	0.061	6.1	7
Pruebas del proceso de estabilización	Compactación suelo limoso	15	0.10	1.50	0.091	9.1	10
	CBR suelo limoso	40	0.10	4.00	0.242	24.2	25
	Compactación suelo arcilloso	15	0.10	1.50	0.091	9.1	10
	CBR suelo arcilloso	40	0.10	4.00	0.242	24.2	25
		165		16.50			111

error%	5	0.05
NC	95	1.96

n=	80
----	----

Fuente: Elaboración propia

Donde se tomará en cuenta un nivel de confianza de 95% y de acuerdo a la variable estandarizada es $Z=1.96$, con un margen de error $e=0.05\%$ que es deducido del nivel de confianza, y por el corto tiempo establecido se asume una varianza de $=0.10$.

Reemplazando se tiene:

$$n = \frac{16.50}{\left(165 * \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2\right) + \frac{16.5}{165}}$$

Tamaño de la muestra (n):

$$n = 80$$

Según el análisis previo se tiene un total de 165 ensayos a realizar para este estudio, de los cuales se requerirá de 81 ensayos para darle una confiabilidad de 95% pero con el análisis estadístico se obtiene un total de 80 ensayos en un periodo de 4 meses.

3.5.1 Procesamiento de la información

El procesamiento de los datos de campo y laboratorio se realizarán mediante matrices de tabulación y gráficos con la finalidad de obtener una mejor interpretación de los resultados.

- Análisis con la estadística descriptiva
- Análisis de la estadística inferencial

3.6 Determinación de la zona de muestreo.

3.6.1 Ubicación

El presente proyecto se realizará con muestras extraídas del Departamento de Tarija está ubicado al sur de la República de Bolivia, limita al norte con el departamento de Chuquisaca, al sur con Argentina al este con Paraguay y el oeste con Chuquisaca y Potosí. Tiene una extensión de 37.623 km² y una población de 534346 habitantes (según el Censo INE 2024).

Figura 3.1: Ubicación geográfica del proyecto



Fuente: Instituto Nacional de Estadística

El presente estudio se encuentra ubicado en la zona urbana de la ciudad de Tarija, provincia cercada del departamento de Tarija, específicamente en las zonas Barrio Tarijeños en Progreso y Urbanización los Ángeles.

Figura 3.2: Ubicación del estudio a nivel departamental



Fuente: Instituto Nacional de Estadística

Tabla 3.3: Ubicación de muestra

Muestra	Barrio	Ubicación UTM	
ML	Urbanización los Ángeles	319753.31 m E	7621765.14 m S
CL	Tarijeños en progreso	323970.39 m E	7619847.68 m S

Muestra	Barrio	Ubicación Geográfica	
ML	Urbanización los Ángeles	Latitud: 21°29'51.74"S	Longitud: 64°44'23.89"N
CL	Tarijeños en progreso	Latitud: 21°30'55.61"S	Longitud: 64°41'58.11"O

Figura 3.4: Zona urbanización los Ángeles



Fuente: Google Earth

Figura 3.5: Zona Segunda Circunvalación



Fuente: Google Earth

3.8 Trabajo en campo

Se realizó el muestreo de suelos mediante calicatas para determinar las propiedades físicas y mecánicas con y sin adición de Bischofita.

3.9 Trabajo en laboratorio

Consistió en la realización de los ensayos a nivel de laboratorio de las propiedades físicas y mecánicas del suelo obtenido en campo; estas se realizaron de acuerdo a las normas ASSHTO.

3.10 Ensayos de caracterización

3.10.1 Contenido de humedad

Figura 3.6: Muestra de suelo para contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Al momento de realizar la extracción de la muestra, se separó una pequeña muestra para realizar el contenido de la humedad del suelo, esta muestra se colocó en una bolsa plástica herméticamente cerrada para evitar la pérdida de humedad.

Para muchos tipos de suelo, el contenido de agua es una de las propiedades índices más significativas, que se emplea para establecer una correlación entre el comportamiento de dicho suelo y otras propiedades índices.

Tabla 3.4: Contenido de humedad suelo M1

Numero	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
1	1.51	1.87	2.65
Promedio	2.01		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5: Contenido de humedad suelo M2

Numero	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
1	3.66	4.48	4.92
Promedio	4.35		

Fuente: Elaboración propia

3.10.2 Análisis granulométrico por tamizado

Este ensayo permite, mediante el tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0.075 mm de una muestra de suelo. Para realizar la granulometría del suelo fino, se debe utilizar 500 gramos de suelo que pase por el tamiz N°10.

Para realizar el método de lavado, se debe utilizar el tamiz N°200, el material retenido en este tamiz, debe colocarse a secar en el horno por 24hrs, para realizar el tamizado se debe usar los tamices N°40 y N°200

Figura 3.7: Proceso del ensayo análisis granulométrico



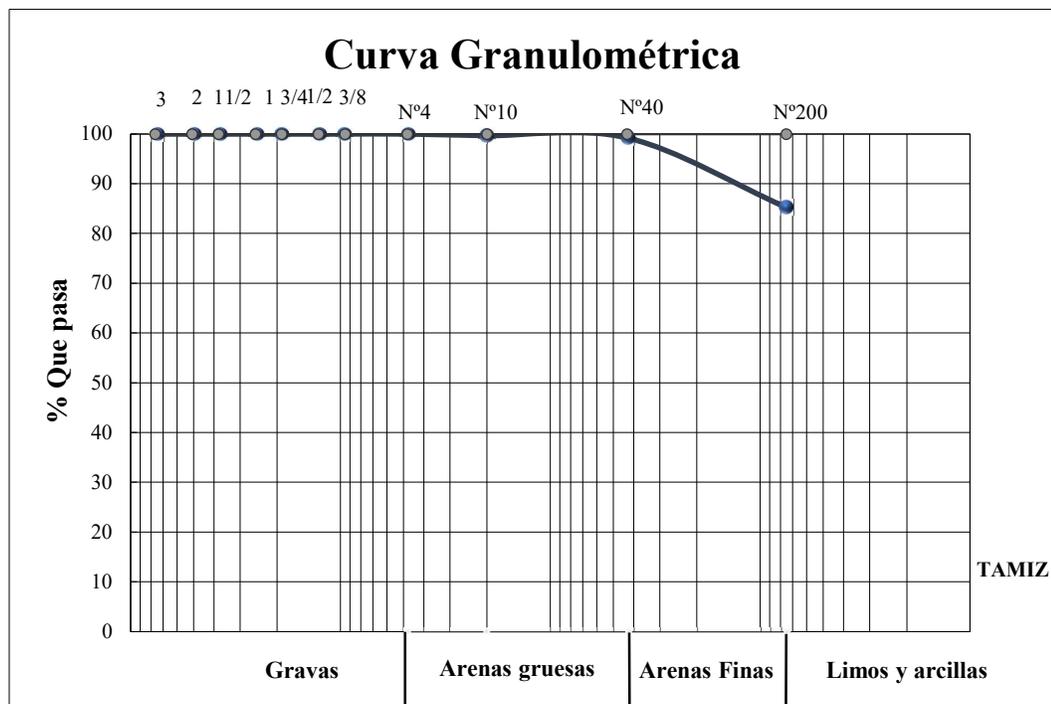
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6: Resultado de análisis granulométrico M-1

Tamices	Muestra ML
	% que pasa del total
3"	100.00
2 1/2"	100.00
2"	100.00
1 1/2"	100.00
1"	100.00
3/4"	100.00
1/2"	100.00
3/8"	100.00
Nº4	100.00
Nº 10	99.70
Nº 40	99.18
Nº 200	85.26

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8: Distribución granulométrica del M-1



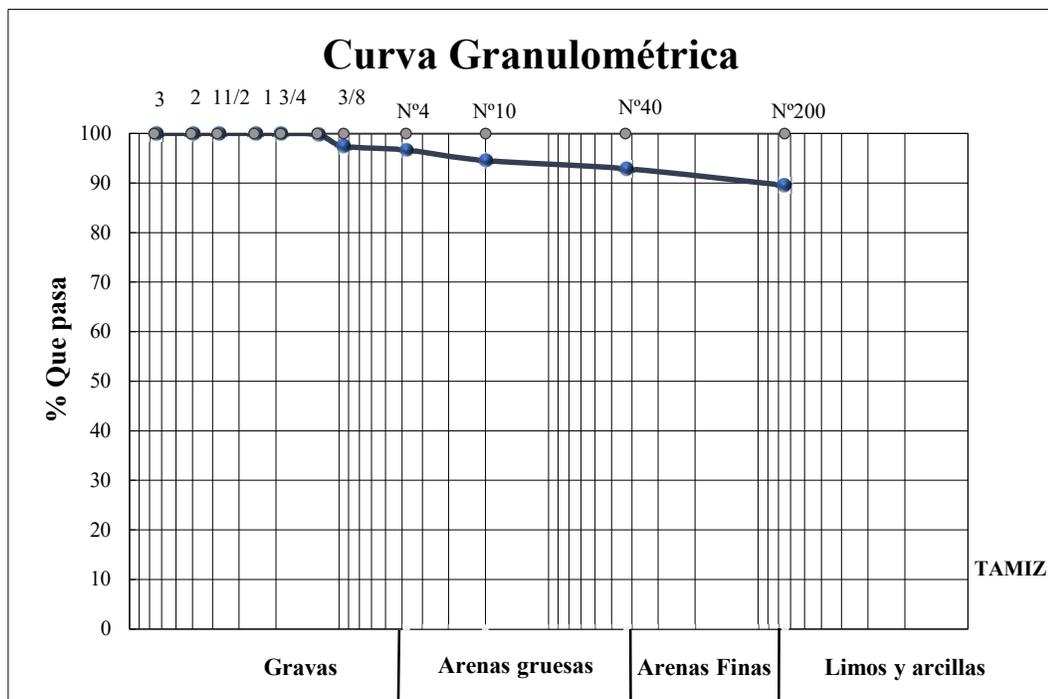
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7: Resultado de análisis granulométrico M-2

Tamices	Muestra CL
	% que pasa del total
3"	100.00
2 1/2"	100.00
2"	100.00
1 1/2"	100.00
1"	100.00
3/4"	100.00
1/2"	100.00
3/8"	100.00
N° 4	96.67
N° 10	94.54
N° 40	92.88
N° 200	89.59

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9: Distribución granulométrica del M-1



Fuente: Elaboración propia

3.10.3 Análisis granulométrico por hidrómetro

Figura 3.10: Proceso del ensayo análisis granulométrico por hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Este ensayo se encuentra basado en el principio de sedimentación de granos de suelo en agua, cuando un espécimen de suelos se sedimenta en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad, se supone que todas las partículas de los suelos son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes, por lo dicho anteriormente se presentan unas restricciones a esta ley que son necesarias tener en cuenta como objeto del estudio que se hace:

- Las partículas finas no son esferas
- El suelo no es homogéneo en cuanto a su composición
- La temperatura del fluido no es constante
- Las partículas finas forman grumos debido a la interacción eléctrica que ocurre entre ellas

El ensayo por hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de

rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz N°10.

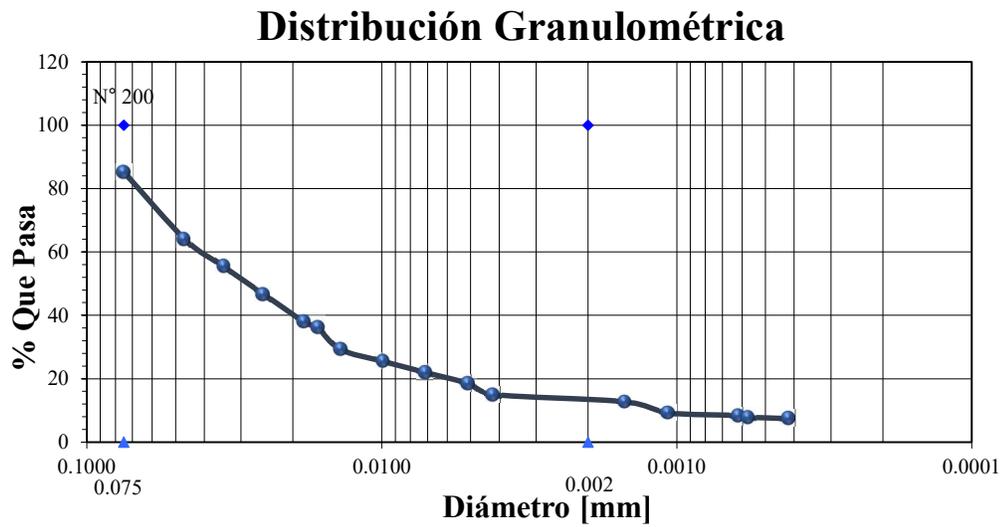
Cuando se quiere más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz N°200.

Tabla 3.8: Resultado de análisis granulométrico por hidrómetro M-1

Muestra ML	
Diámetro partícula [mm]	% Mas fino
0.0750	85.260
0.0467	64.494
0.0344	55.739
0.0252	46.985
0.0184	38.230
0.0166	36.479
0.0139	29.475
0.0099	25.623
0.0071	22.121
0.0051	18.619
0.0042	15.118
0.0015	12.841
0.0011	9.340
0.0006	8.464
0.0006	7.939
0.0004	7.501

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11: Distribución granulométrica del M-1



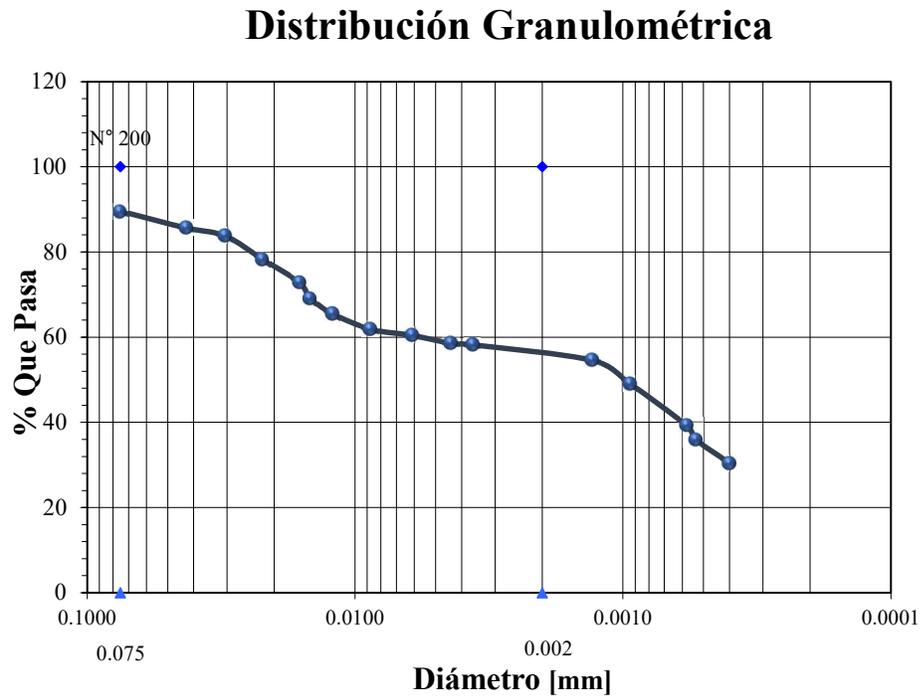
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9: Resultado de análisis granulométrico por hidrómetro M-2

Muestra CL	
Diámetro partícula [mm]	% Mas fino
0.075	89.590
0.043	85.677
0.031	83.848
0.022	78.360
0.016	72.872
0.015	69.213
0.012	65.554
0.009	61.895
0.006	60.432
0.004	58.602
0.004	58.237
0.001	54.578
0.001	49.090
0.001	39.211
0.001	35.918
0.000	30.430

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12: Distribución granulométrica M-2



Fuente: Elaboración propia

3.10.4 Calibración de frasco volumétrico

Figura 3.13: Calibración del frasco



Fuente: Elaboración propia

Los frascos volumétricos de vidrio, cuando son expuestos a diferentes temperaturas, sufren ligeros cambios en su volumen es decir si se aumenta la temperatura el vidrio tiende a la dilatación incrementando ligeramente su volumen y cuando se disminuye la temperatura su volumen también disminuye.

El agua sufre un incremento en su peso cuando se aumenta su temperatura o viceversa. Estos cambios si bien no son considerables, pueden corregirse a través de la realización de una curva de calibración para cada frasco volumétrico. La calibración del frasco será de utilidad para realizar los cálculos del peso específico del suelo.

Tabla 3.10: Resultado de la calibración del frasco volumétrico

N°	Muestra 1	
	Temp °C	Peso (gr)
1	30	714.14
2	27	714.80
3	24	715.20
4	22	715.60
5	17	715.80
6	15	716.00

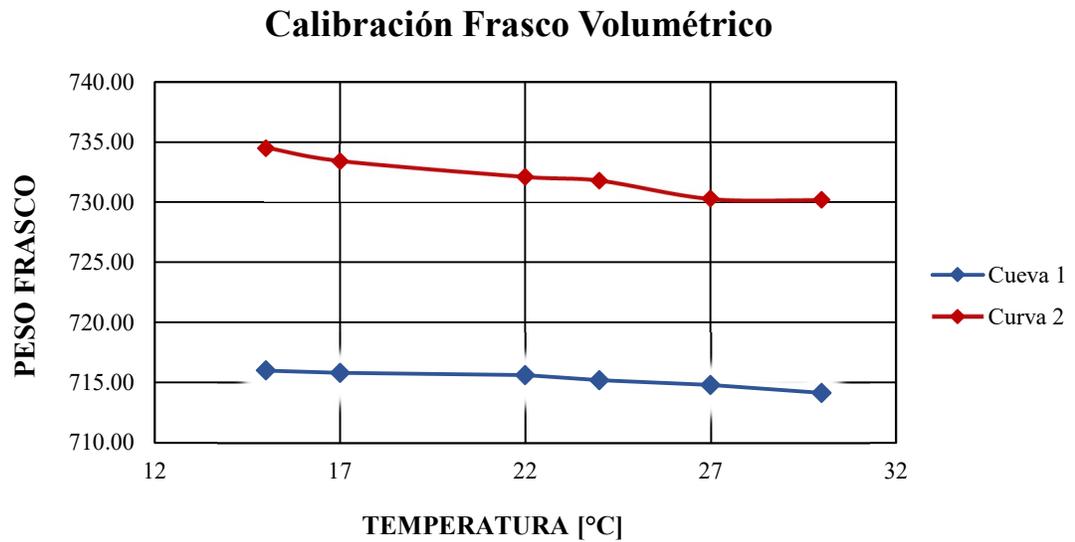
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11: Resultado de la calibración del frasco volumétrico

N°	Muestra 2	
	Temp °C	Peso (gr)
1	30	730.20
2	27	730.30
3	24	731.80
4	22	732.10
5	17	733.40
6	15	734.50

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14: Curva de calibración de los frascos volumétricos

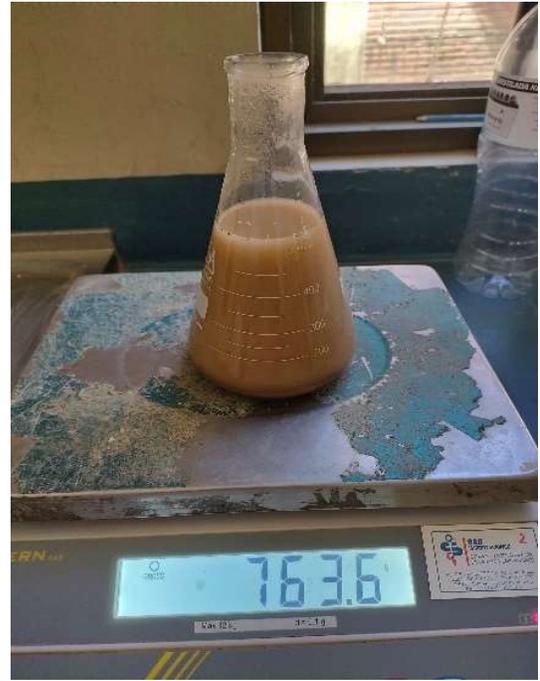


Fuente: Elaboración propia

3.10.5 Determinación del peso específico

Figura 3.15: Proceso de determinación del peso específico





Fuente: Elaboración propia

El peso específico relativo de los sólidos de un suelo se determina en laboratorio haciendo uso de un frasco con marca de enrase. El peso específico se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}}$$

Donde:

γ = Peso específico relativo de un suelo

W_s = Peso del suelo seco

W_{fw} = Peso del frasco lleno de agua

W_{fsw} = Peso del frasco con suelo y agua

Tabla 3.12: Resultados del ensayo de peso específico

N°	Muestra M1		Muestra M2	
	Temp °C	Peso (g)	Temp °C	Peso (g)
1	30.00	2.70	28.00	2.68
2	24.00	2.68	25.00	2.55
3	19.00	2.65	19.00	2.48
4	16.00	2.65	16.00	2.48
	Promedio	2.67	Promedio	2.55

Fuente: Elaboración propia

3.10.6 Límites de Atterberg

3.10.6.1 Límite líquido

Figura 3.16: Determinación de límite líquido equipo casa grande



Fuente: Elaboración propia

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande.

El límite líquido es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico.

Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

3.10.6.2 Limite plástico

Figura 3.17: Determinación límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Este método establece el procedimiento para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.

El límite plástico, es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0.5 a 1cm de largo y no puedan ser re amasados ni reconstituidos.

Tabla 3.13: Resultados de los límites de Atterberg

Muestra N°	Límite líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Índice de grupo
M-1	25	23	2	8
M-2	30	16	14	10

Fuente: Elaboración propia

3.10.7 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 3.14: Resumen de resultados de la clasificación del suelo

Cercado Tarija		
Muestra	Clasificación	Descripción
M-1	SUCS: ML AASHTO: A-4 (8)	Limo de baja plasticidad
M-2	SUCS: CL AASHTO: A-6 (10)	Arcilla Inorgánica de mediana plasticidad

Fuente: Elaboración propia

3.10.8 Compactación (ASSHTO T272).

Figura 3.18: Determinación de densidad seca y humedad óptima



Fuente: Elaboración propia

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo compactado en un molde normalizado mediante un pisón de 4.5 kg. en caída libre, desde una altura de 460 mm, con una energía específica de compactación de 2.67 g/cm^3 .

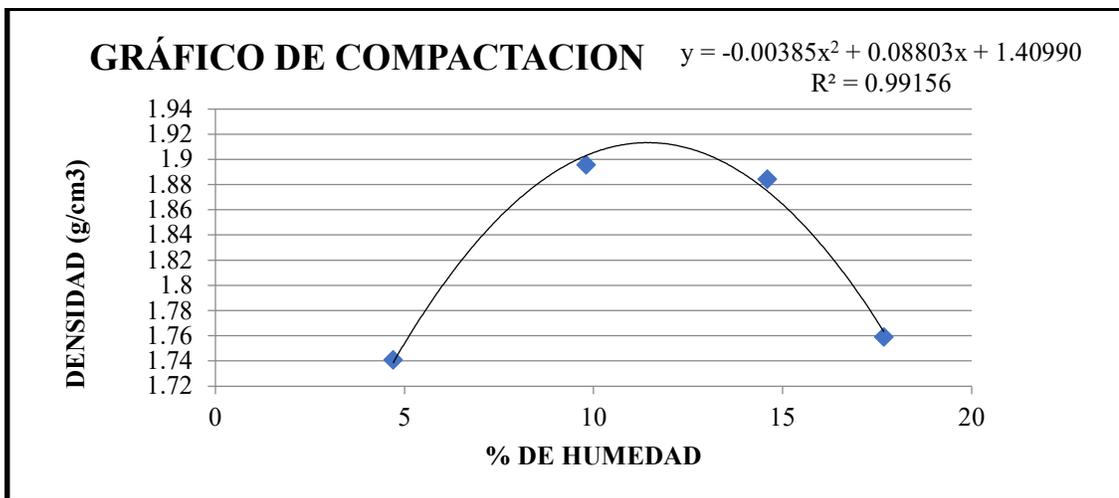
Para realizar la compactación se debe usar suelo seco que pasa por el tamiz N°4, pero debido a que las partículas del suelo no se disgregaron de forma adecuada, se trabajó con el tamiz N°10 para tener una mejor distribución del tamaño de la muestra.

Tabla 3.15: Resultados de compactación

Muestra	Humedad	Densidad
N°	optima (%)	seca (gr/cm ³)
ML	11	1.96
CL	14	1.82

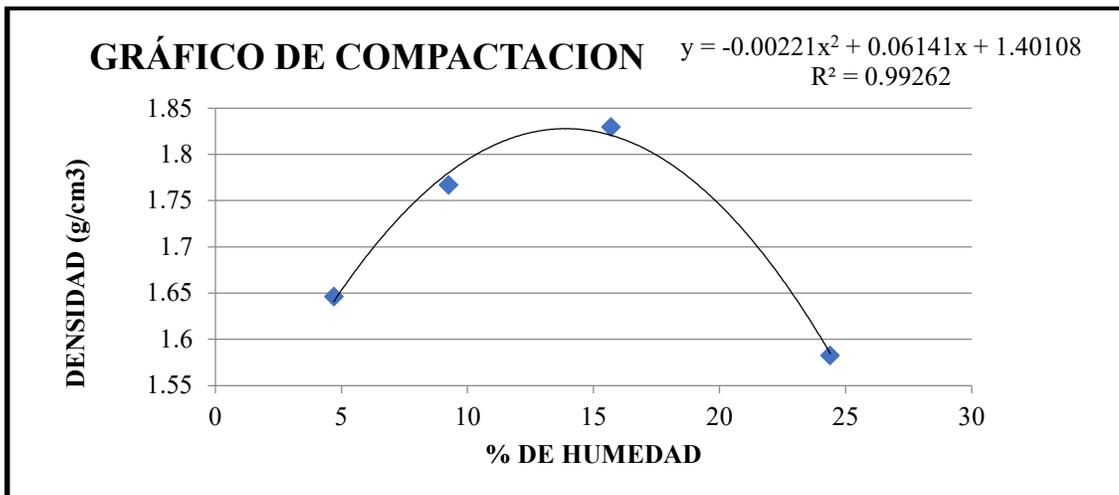
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.19: Curva de compactación M-1



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20: Curva de compactación M-2



Fuente: Elaboración propia

3.10.9 Relación de soporte de California C.B.R.

Figura 3.21: Determinación de C.B.R.



Fuente: Elaboración propia

El ensayo de C.B.R. se realizó de acuerdo a la norma A.A.S.H.T.O. T193, para obtener la resistencia del suelo, y así evaluar la capacidad de soporte del suelo en la capa de subrasante.

De acuerdo a la norma, para la obtención de los diferentes C.B.R. se efectuaron tres moldes con distinta energía de compactación, cada uno con 5 capas de 12, 25 y 56 golpes respectivamente.

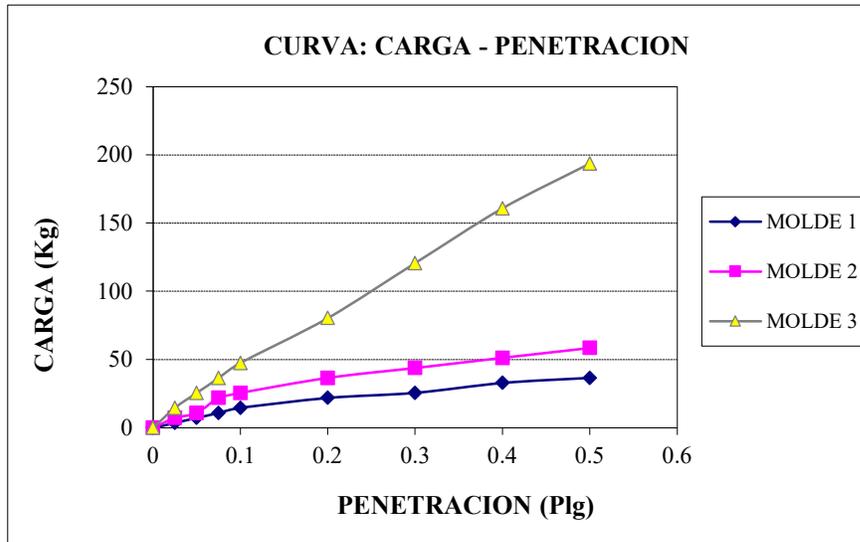
Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos, se sometieron a un proceso de inmersión en agua para simular las condiciones de saturación a las cuales podrían estar sometidos los suelos como es la subrasante de una carretera, y en esta forma, obtener los C.B.R. de los suelos bajo las condiciones más críticas; esto durante un periodo de 96 horas donde se colocan 2 pesas sobre las mismas con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares como estructurales del pavimento, y por otro lado determinar su expansión efectuando lecturas diarias.

Tabla 3.16: Resultados de pesos unitarios del ensayo C.B.R.

Muestra N°	C.B.R. (95 %)	C.B.R. (100 %)
M-1	4	5
M-2	2	3

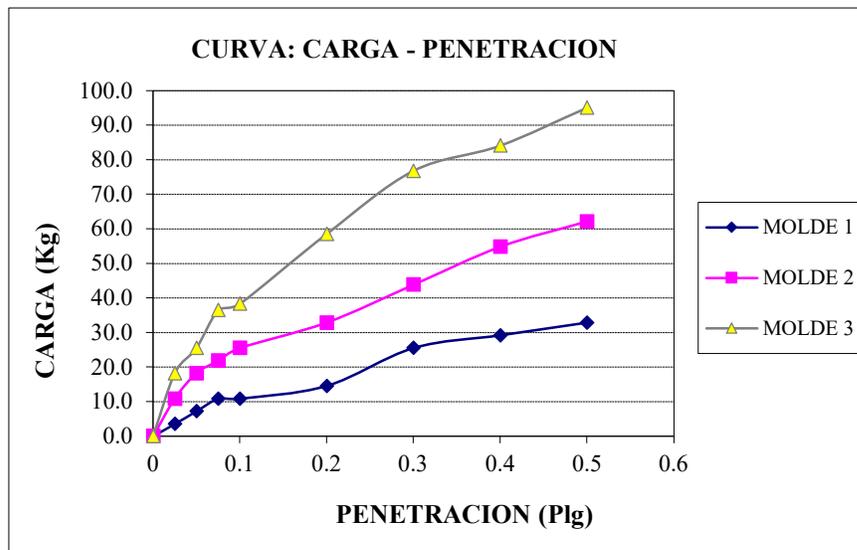
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22: Gráfico carga – penetración Suelo M-1



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.23: Gráfico carga – penetración Suelo 2

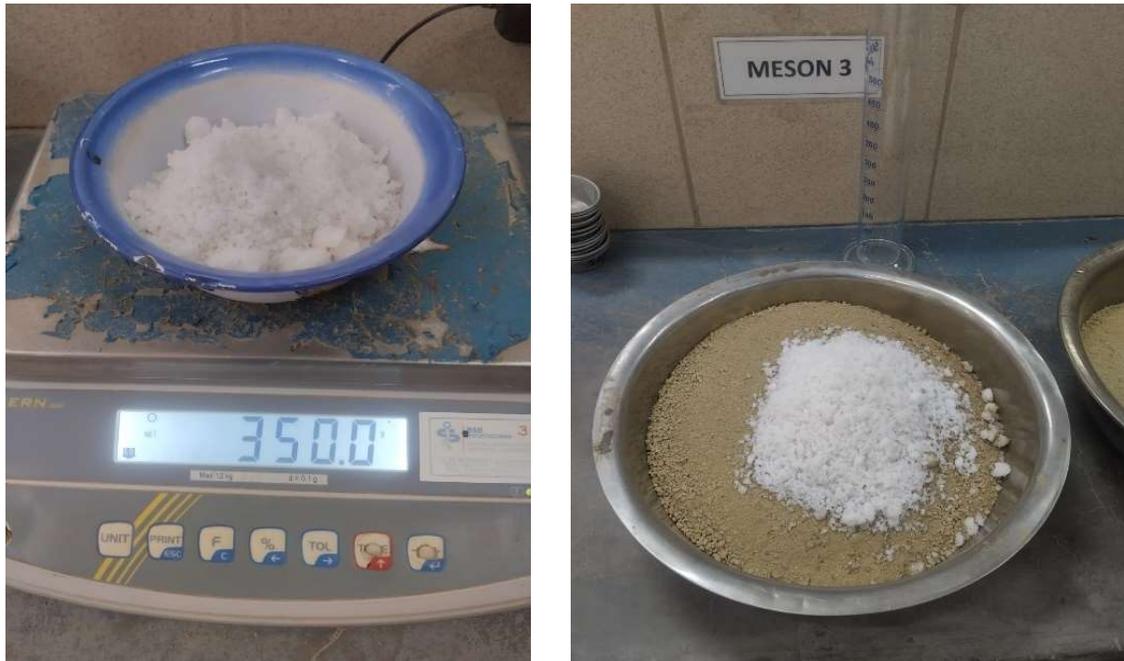


Fuente: Elaboración propia

3.11 Estabilización de suelo – Bischofita

3.11.1 Dosificación de Bischofita

Figura 3.24: Adición de Bischofita



Fuente: Elaboración propia

No se ha estipulado una normativa específica con respecto a la dosificación de estabilización. 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 aditivo empleado.

Por ende, basándose en las recomendaciones antes mencionadas, se propone una estrategia de estabilización con porcentajes de 1%, 3%, 5% y 7%.

3.12 Granulometría

Suelo patrón M-1: Presenta una granulometría con un paso del 85.26% por el tamiz N°200, lo que indica una gran cantidad de partículas finas en el suelo (limo y arcilla). Esto es característico de suelos con baja capacidad de soporte y alta plasticidad.

Suelo patrón M-2: Similar al M-1, con un 89.59% de finos pasando por el tamiz N°200, lo que refuerza las propiedades poco cohesionadas de este suelo.

Impacto de la Bischofita: La granulometría no sufre alteraciones significativas con la adición de Bischofita, ya que esta no modifica el tamaño de las partículas. Sin embargo, la Bischofita mejora la cohesión entre las partículas finas, reduciendo la dispersión y controlando la erosión.

3.13 Límites de Atterberg y Plasticidad

Suelo Patrón M-1 y M-2:

M-1: Presenta un índice de plasticidad bajo (IP=2%), lo que indica un comportamiento estable en términos de deformación bajo cambios de humedad.

M-2: Con un índice de plasticidad mayor (IP=14%), es más susceptible a la expansión y contracción, lo que genera problemas en condiciones de humedad.

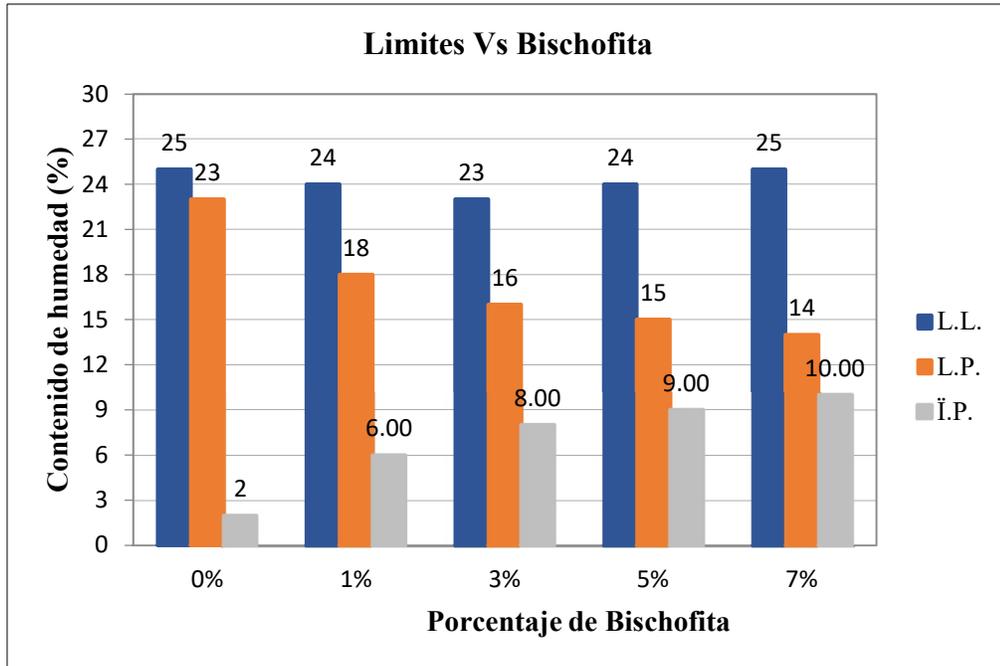
3.13.1 Límites de Atterberg

Tabla 3.17: Resumen límites de Atterberg M-1 aplicando % Bischofita

Tabla resumen			
Clasificación	ML		
Descripción	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad
Natural	25	23	2
1% Bischofita	24	18	6
3% Bischofita	23	16	8
5% Bischofita	24	15	9
7% Bischofita	25	14	10

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25: Influencia de la Bischofita en los límites de Atterberg M-1



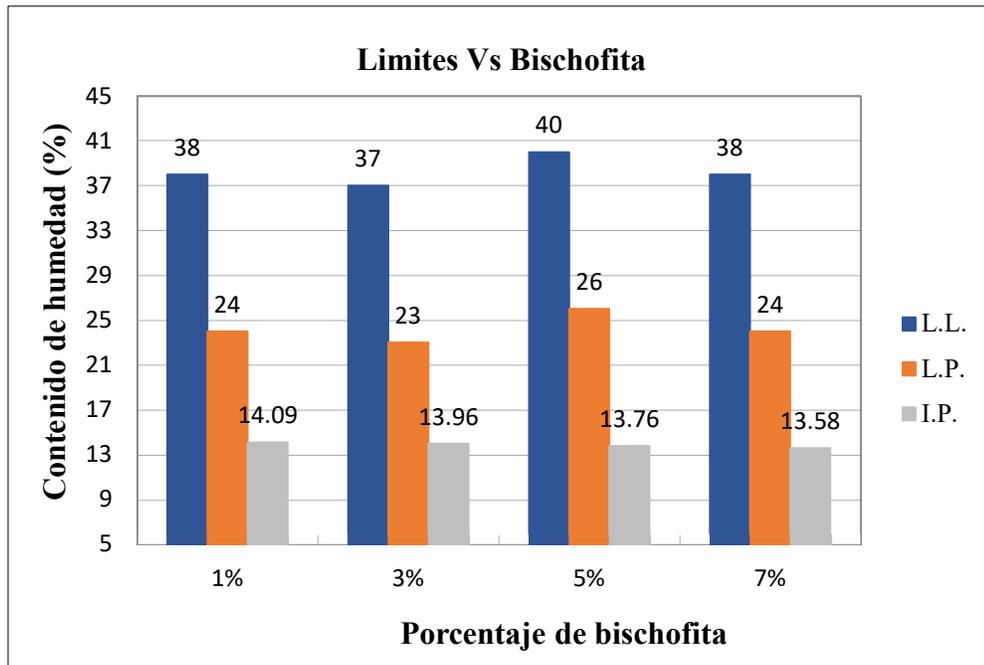
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18: Resumen límites de Atterberg M-2 aplicando % Bischofita

Tabla resumen			
Clasificación	CL		
Descripción	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad
Natural	30	16	14
1% Bischofita	38	24	14
3% Bischofita	37	23	14
5% Bischofita	40	26	14
7% Bischofita	38	24	14

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.26: Influencia de la Bischofita en los límites de Atterberg M-2



Fuente: Elaboración propia

Suelo estabilizado con Bischofita:

En el caso del **M-1**, al aplicar hasta 7% de Bischofita, el índice de plasticidad aumentó ligeramente hasta 10%, lo que sugiere que la Bischofita controla la plasticidad manteniendo el suelo menos propenso a la contracción y expansión.

En el **M-2**, los resultados muestran que, incluso con un 7% de Bischofita, el índice de plasticidad permanece en 14%, lo que sugiere que la Bischofita mantiene el suelo en un estado de plasticidad controlada sin comprometer su estabilidad bajo condiciones cambiantes de humedad

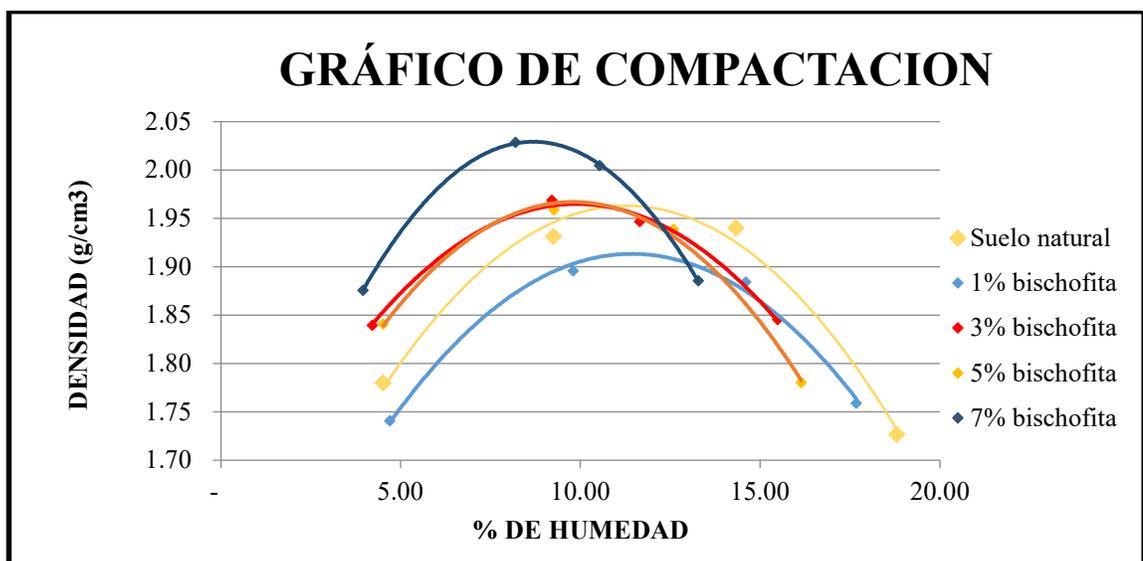
3.13.2 Compactación

Tabla 3.19: Resumen de resultados de compactación M-1

% de Bischofita	Compactación	
	CHO	D.max.
1%	11	1.96
3%	10	1.96
5%	10	1.97
7%	9	2.03

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.27: Curva de compactación 1%, 3%, 5%, 7% de Bischofita M-1



Fuente: Elaboración propia

La tabla muestra los valores de densidad seca máxima obtenidos tras la adición de diferentes porcentajes de Bischofita (1%, 3%, 5%, y 7%).

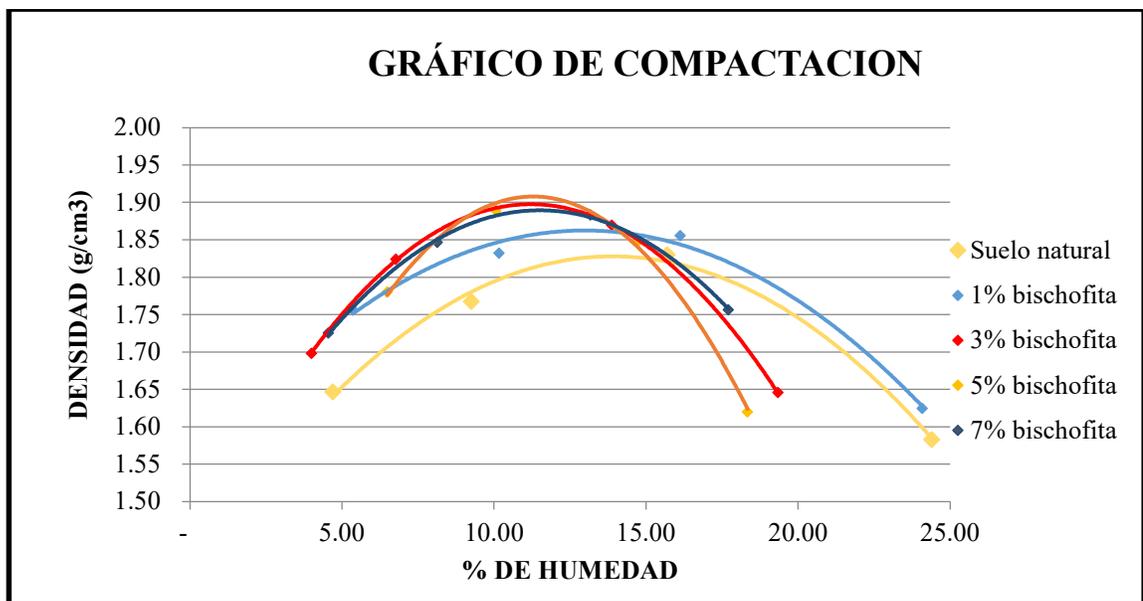
Tendencia General: Se observa un aumento en la densidad seca máxima conforme se incrementa la cantidad de Bischofita, y una disminución considerable en el contenido de humedad óptimo. Esto indica que la adición de este estabilizador mejora la compactación del suelo, lo que es beneficioso para aumentar la capacidad de soporte del mismo.

Tabla 3.20: Resumen de resultados de compactación M-2

% de Bischofita	Compactación	
	CHO	D. max.
1%	13	1.86
3%	11	1.90
5%	11	1.91
7%	12	1.89

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.28: Curva de compactación 1%, 3%, 5%, 7% de Bischofita M-2

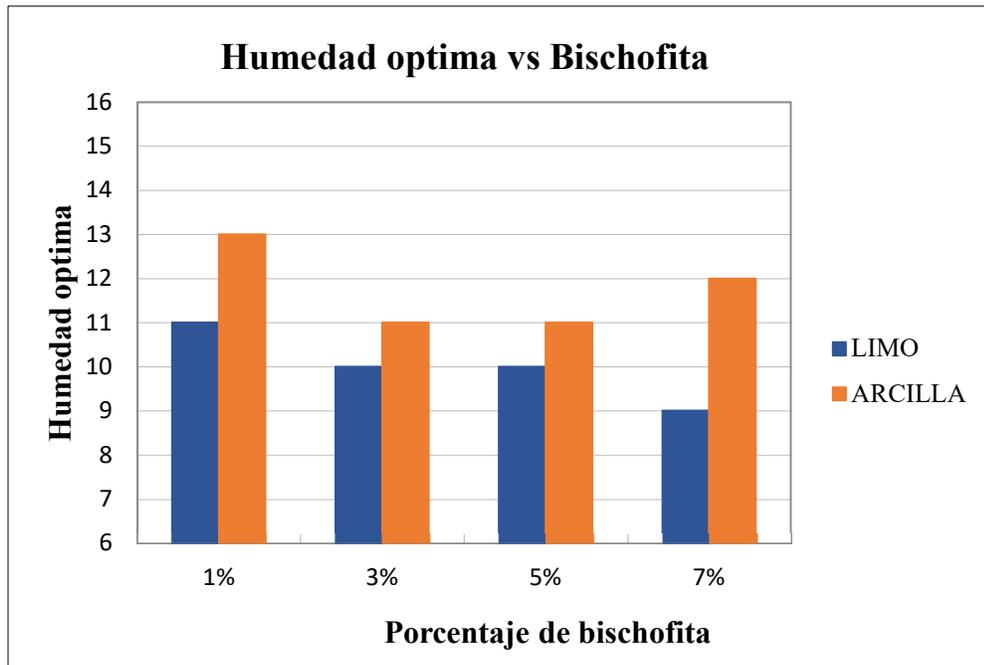


Fuente: Elaboración propia

Esto indica que conforme se incrementa el porcentaje de Bischofita, el suelo tiende a compactarse mejor, lo que mejora su capacidad de soporte.

Se observa el incremento significativo de la densidad máxima seca y disminución del contenido de humedad óptimo lo que mejora la interacción entre partículas mejorando así el proceso de compactado.

Figura 3.29: Influencia de la Bischofita en la humedad óptima



Fuente: Elaboración propia

3.14 Humedad óptima

Muestra M-1: La humedad óptima para el suelo patrón M-1 fue de aproximadamente **11%**, con una densidad seca máxima de **1.96 g/cm³**.

Muestra M-2: Para la muestra M-2, la humedad óptima fue ligeramente superior, alcanzando el **14%**, con una densidad seca máxima de **1.82 g/cm³**.

Análisis del suelo patrón:

M-1 y **M-2** mostraron comportamientos típicos de suelos finos (limos y arcillas) que requieren una cantidad significativa de humedad para alcanzar su compactación óptima. Esto se debe a que las partículas finas en estos suelos tienen una alta capacidad de absorción de agua, lo que aumenta la cantidad de humedad necesaria para lograr una densidad adecuada.

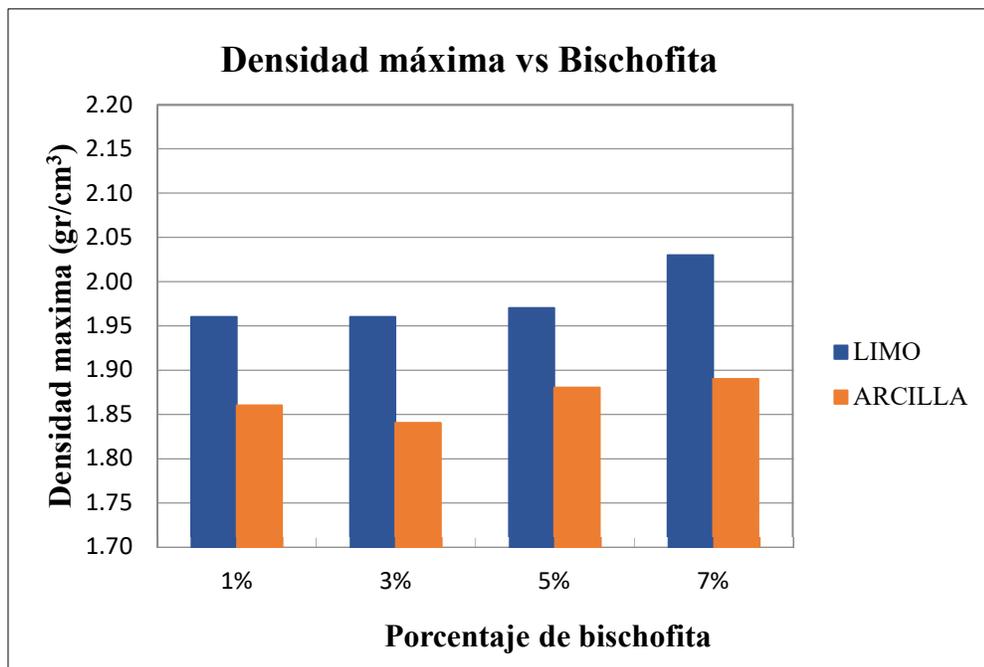
Sin embargo, estos suelos también son susceptibles a la pérdida de resistencia cuando hay exceso de humedad, ya que pueden volverse inestables bajo condiciones de saturación.

3.14.1 Influencia en la humedad óptima:

- **Muestra M-1 estabilizada:** La aplicación de Bischofita redujo ligeramente la humedad óptima de 11% a 9%, lo que indica que el suelo estabilizado necesita menos agua para alcanzar su densidad máxima. Esto se debe a las propiedades higroscópicas de la Bischofita, que ayudan a retener la humedad en el suelo y mejorar su cohesión.
- **Muestra M-2 estabilizada:** En el suelo M-2, la Bischofita también redujo la humedad óptima de 14% a 12%, lo que sugiere que la Bischofita mejora la compactación del suelo con menos humedad disponible.

3.14.2 Influencia en la densidad máxima

Figura 3.30: Influencia de la Bischofita en la densidad máxima



Fuente: Elaboración propia

En ambos suelos (M-1 y M-2), la densidad seca máxima también aumentó tras la estabilización. En el caso de M-1, la densidad seca máxima pasó de 1.97 g/cm³ a 2.03 g/cm³ con la aplicación de Bischofita, y en M-2, de 1.82 g/cm³ a 1.91 g/cm³.

Este comportamiento indica que la Bischofita mejora la capacidad del suelo para compactarse eficientemente sin necesidad de tanta agua como en el suelo patrón, lo que es beneficioso en regiones donde la disponibilidad de agua es limitada.

3.14.3 Relación de soporte de California C.B.R.

Tabla 3.21: Resumen de resultados C.B.R. M-1

% de Bischofita	CBR		CBR 1		CBR 2	
	CBR 95%	CBR 100%	CBR 95%	CBR 100%	CBR 95%	CBR 100%
1%	1	2	1	2	1	2
3%	6	7	6	7	6	7
5%	4	5	4	5	4	5
7%	3	4	2	3	2	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22: Resumen de resultados C.B.R. M-2

% de Bischofita	CBR		CBR 1		CBR 2	
	CBR 95%	CBR 100%	CBR 95%	CBR 100%	CBR 95%	CBR 100%
1%	3	4	3	4	4	5
3%	7	9	6	8	6	8
5%	3	4	3	3	3	4
7%	3	3	3	3	3	3

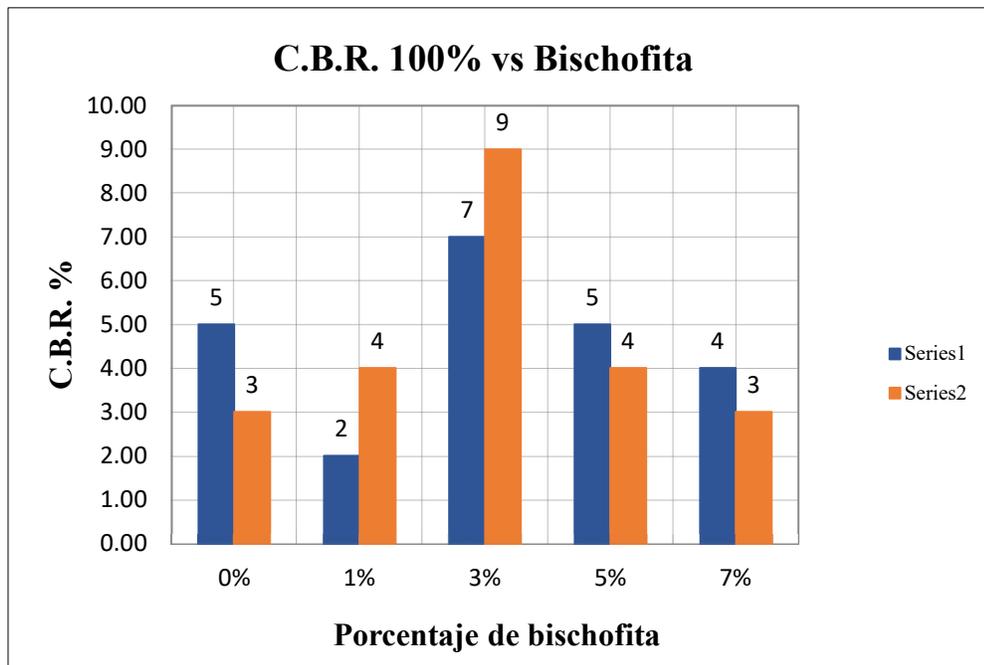
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23: Tabla resumen de CBR

Muestra	Descripción % Bischofita	CBR al	CBR al
		95 (%)	100 (%)
ML	0%	4	5
	1%	1	2
	3%	6	7
	5%	4	5
	7%	3	4
CL	0%	2	3
	1%	3	4
	3%	7	9
	5%	3	4
	7%	3	3

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.31: Influencia de la Bischofita en el CBR al 100%



Fuente: Elaboración propia

3.15 Interpretación de los resultados del suelo M-1 (Limo)

CBR del suelo sin estabilizar (0% Bischofita):

El suelo M-1 sin estabilización presenta valores de CBR bajos, de 4% al 95% de compactación y 5% al 100%. Estos valores indican que el suelo limoso tiene una capacidad de soporte limitada, lo que lo hace inadecuado para soportar cargas de tráfico sin sufrir deformaciones significativas.

CBR del suelo estabilizado con 1% de Bischofita:

Al aplicar 1% de Bischofita, el CBR disminuye a 1% (95%) y 2% (100%). Este comportamiento puede deberse a una cantidad insuficiente de Bischofita para mejorar significativamente la cohesión del suelo, lo que lleva a una ligera pérdida de la capacidad de soporte en lugar de una mejora.

CBR del suelo estabilizado con 3% de Bischofita:

Con una adición de 3% de Bischofita, el CBR mejora notablemente, alcanzando 6% (95%) y 7% (100%). Este resultado muestra que la dosificación óptima de Bischofita para suelos limosos se encuentra alrededor del 3%, ya que logra una mayor cohesión entre las partículas de suelo, lo que aumenta su resistencia a la penetración.

CBR del suelo estabilizado con 5% y 7% de Bischofita:

A concentraciones superiores al 3%, los valores del CBR disminuyen nuevamente a 3%-5%. Esto sugiere que un exceso de Bischofita puede saturar el suelo, generando efectos negativos en la estructura interna del suelo, lo que provoca una reducción en la capacidad de soporte.

3.16 Interpretación de los resultados del suelo M-2 (Arcilla)

– CBR del suelo sin estabilizar (0% Bischofita):

El suelo M-2 (arcilla) sin estabilizar presenta un CBR aún más bajo que el M-1, con 2% al 95% y 3% al 100% de compactación. Esto refleja las características típicas de los suelos arcillosos, que son más susceptibles a la deformación bajo carga debido a su alta plasticidad.

– CBR del suelo estabilizado con 1% de Bischofita:

Con la adición de 1% de Bischofita, el CBR aumenta ligeramente a 3% (95%) y 4% (100%). Esto muestra una mejora mínima, indicando que la adición de pequeñas cantidades de Bischofita no es suficiente para generar un cambio considerable en la capacidad de soporte de los suelos arcillosos.

– **CBR del suelo estabilizado con 3% de Bischofita:**

Al aplicar un 3% de Bischofita, se observa una mejora significativa, con valores de CBR de 7% al 95% y 9% al 100%. Estos resultados indican que la Bischofita ha mejorado considerablemente la cohesión de las partículas de arcilla, reduciendo su expansión y aumentando la resistencia a la penetración.

– **CBR del suelo estabilizado con 5% y 7% de Bischofita:**

A concentraciones más altas de Bischofita (5% y 7%), no se observan mejoras adicionales. El CBR se mantiene en rangos de 3%-4%, lo que sugiere que dosis mayores de Bischofita no mejoran la capacidad de soporte y podrían incluso generar una reducción en la estabilidad debido a la saturación del suelo.

Comparación entre M-1 (limo) y M-2 (arcilla)

Sin estabilización: Ambos suelos presentan bajos valores de CBR, pero el suelo M-2 (arcilla) es más débil que el suelo M-1 (limo). Esto es consistente con las propiedades de los suelos finos, ya que los suelos arcillosos tienden a ser más plásticos y expansivos, lo que reduce su capacidad de soporte.

– **Con estabilización (1% Bischofita):** En ambos suelos, la adición del 1% de Bischofita no es suficiente para generar mejoras significativas en el CBR. De hecho, en el suelo M-1 (limo), se observa una ligera reducción del CBR, lo que indica que dosis bajas pueden no ser adecuadas para estabilizar estos suelos.

– **Con estabilización (3% Bischofita):** En ambos suelos, la dosificación del 3% de Bischofita genera mejoras significativas en el CBR, especialmente en el suelo arcilloso (M-2). Esto sugiere que esta concentración es óptima para estabilizar suelos finos, ya que mejora la cohesión y reduce la plasticidad, aumentando la capacidad de soporte.

- **Con estabilización (5% y 7% Bischofita):** En ambos suelos, dosis más altas de Bischofita no generan mejoras adicionales en el CBR. De hecho, se observa una tendencia a la reducción de la capacidad de soporte, probablemente debido a la saturación del suelo con el estabilizador, lo que afecta negativamente la estructura del suelo.

3.17 Análisis del porcentaje óptimo de Bischofita a emplear

Se analizará los datos de CBR obtenidos de los diferentes porcentajes de combinación suelo-Bischofita (1%, 3%, 5% y 7%).

Obtención del porcentaje óptimo

Para definir un correcto desempeño de la capa sub rasante, se opta por elegir una categoría de sub rasante regular, ya que, en esta condición y la aplicación del aditivo propuesto, se podría lograr que esta condición se cumpla para ambas muestras.

Tabla 3.24: Categoría de sub rasantes

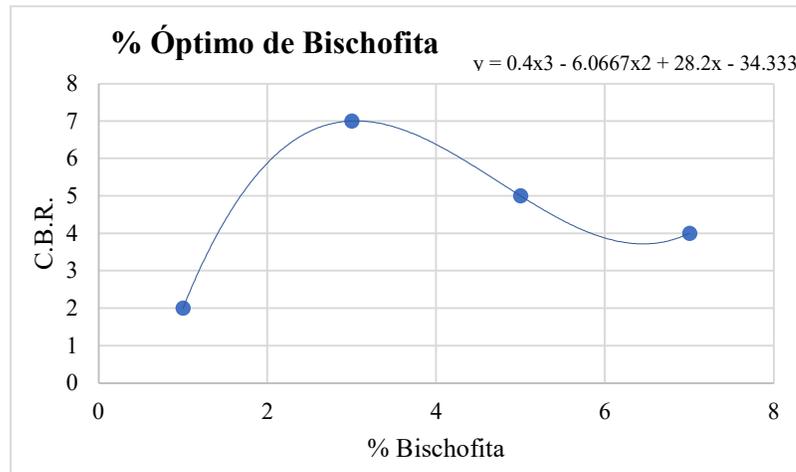
Categorías de Sub rasante	CBR
S0: Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Sub rasante Insuficiente	De CBR > 3% A CBR < 6%
S2: Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S3: Sub rasante Buena	De CBR > 10% A CBR < 20%
S4: Sub rasante Muy Buena	De CBR > 20% A CBR < 30%
S5: Sub rasante Excelente	CBR > 30%

Fuente: Manual de suelos, Geología, geotecnia y pavimentos (2014)

Para determinar el porcentaje de Bischofita que maximiza el desempeño mecánico del suelo, medido mediante el Índice de Soporte de California (CBR). se evaluaron los resultados experimentales obtenidos para diferentes porcentajes de Bischofita que se ajustaron mediante una ecuación matemática que describe la relación entre el CBR y el porcentaje de Bischofita.

A partir de los datos experimentales, se generaron curvas de tendencia que representan el comportamiento del CBR en función del porcentaje de Bischofita.

Figura 3.32: % Óptimo bajo condición de C.B.R. para una subrasante regular M-1



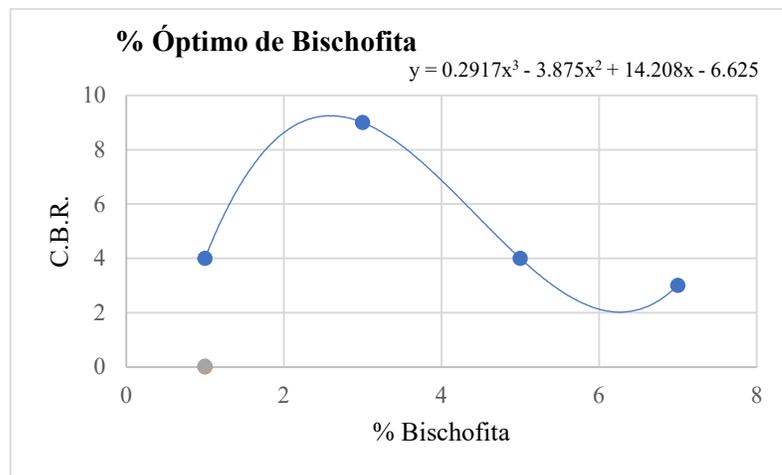
Fuente: Elaboración propia

Suelo M-1 (limo):

Para M-1 suelo limoso se obtuvo un porcentaje óptimo de 2.87 %

- Este suelo, debido a su menor cohesión y mayor permeabilidad, muestra un óptimo ligeramente menor de Bischofita a porcentajes más altos, el efecto estabilizador podría disminuir porque el suelo limoso tiene menos capacidad de interacción química.

Figura 3.33: % Óptimo bajo condición de C.B.R. para una subrasante regular M-2



Fuente: Elaboración propia

Suelo M-2 (arcilla):

Para el suelo M-2 arcilla se obtuvo un valor de 2.96 %.

- La arcilla, con mayor cohesión y capacidad de retención de agua, responde mejor a un porcentaje ligeramente mayor de Bischofita.
- Esto se debe a que las partículas de arcilla tengan más capacidad de formar enlaces químicos con la Bischofita, mejorando el CBR.

La validez de estos valores se confirma mediante las gráficas de carga-penetración (CBR) y otros parámetros como densidad seca máxima y humedad óptima.

3.17.1 Análisis de C.B.R. – M-1 con 2.87% de Bischofita

Tabla 3.25: Valores de C.B.R. óptimos M-1

Muestra	Dosificación (%)	CBR (%)
Barrio Urbanización los Ángeles A-4(8) M-1	2.87%	6.87
		7.33
		7.11
		6.43
		7.06
		6.87
		7.01
		6.44
		6.94
		7.67
		7.61
		6.67
		6.76
		6.94
		6.44
		6.93
		6.36
		7.67
7.09		
6.35		

Fuente: Elaboración propia

3.17.2 Análisis de C.B.R. – M-2 con 2.96 % de Bischofita

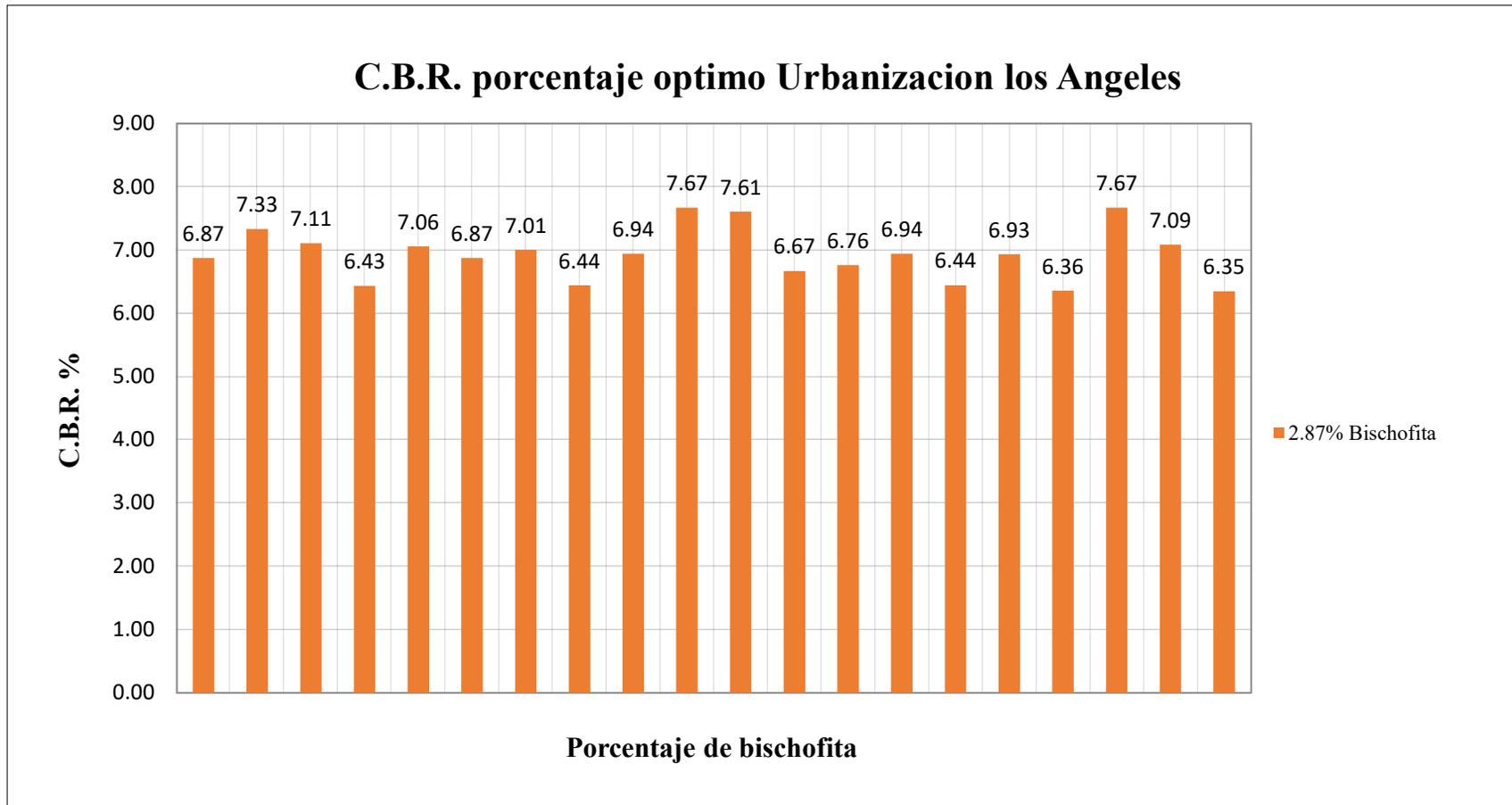
Tabla 3.26: Valores de C.B.R. óptimos M-2

Muestra	Dosificación (%)	CBR (%)
Barrio Tarijeños en Progreso A-6(10) M-2	2.96%	9.05
		7.90
		7.76
		8.89
		8.91
		8.87
		8.10
		8.18
		7.90
		8.00
		7.77
		7.39
		7.33
		7.76
		7.37
		7.28
		6.65
6.51		
6.92		
6.97		

Fuente: Elaboración propia

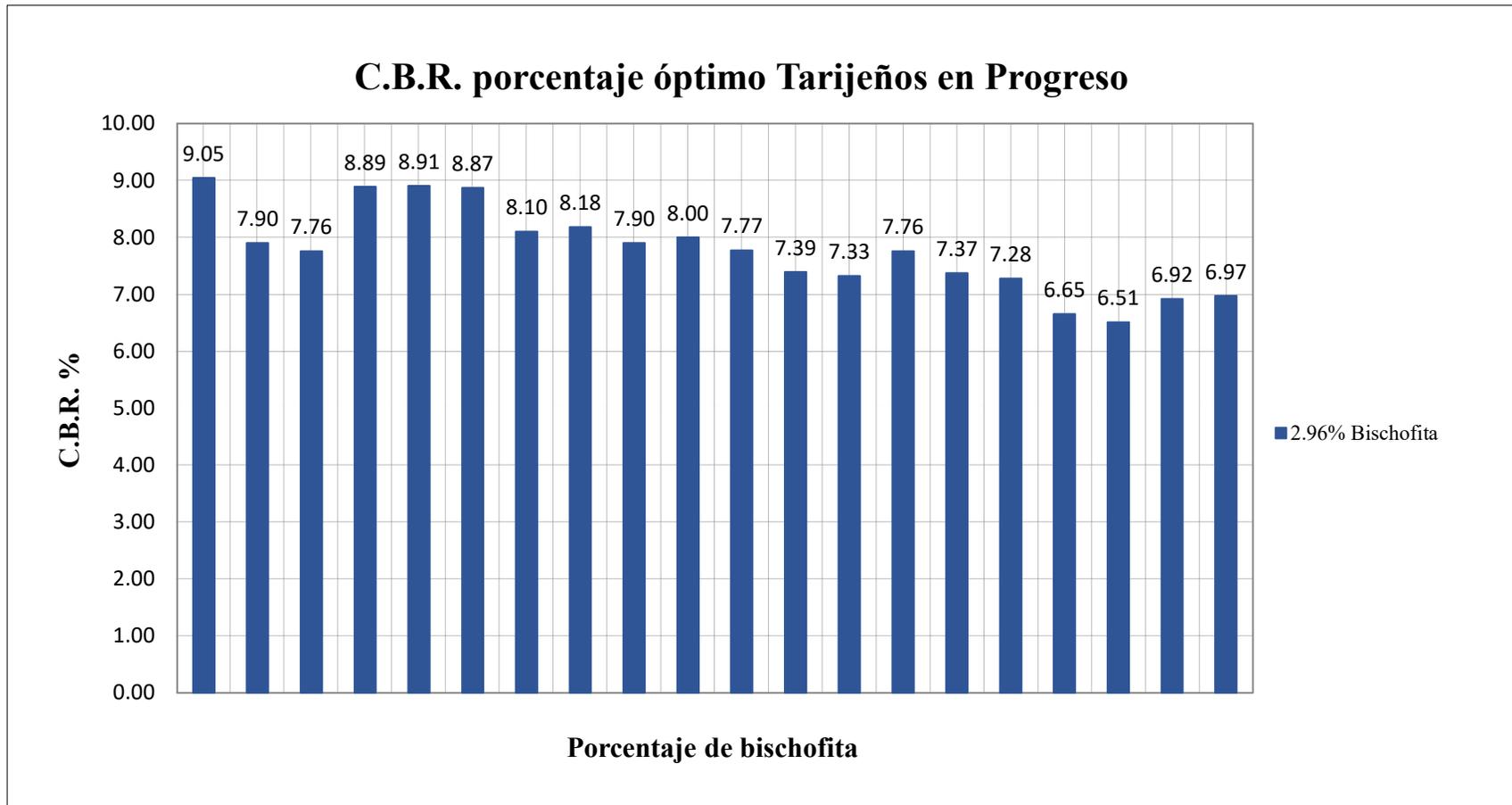
En las gráficas presentadas a continuación, se observa la relación entre el CBR y el porcentaje de Bischofita para cada tipo de suelo. Las curvas de tendencia polinómicas destacan el punto máximo de CBR alcanzado para los porcentajes óptimos mencionados. Estas gráficas validan que la adición de Bischofita en los niveles determinados mejora significativamente las propiedades mecánicas de los suelos, convirtiéndolos en materiales adecuados para su uso en subrasante.

Figura 3.34: C.B.R. óptimo M-1



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.35: C.B.R. óptimo M-2



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE

RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de resultados

El presente capítulo tiene como objetivo analizar e interpretar los resultados obtenidos de la caracterización de los suelos en estudio en su estado natural, así como los resultados obtenidos después de aplicar la estabilización utilizando Bischofita.

Tabla 4.1: Resultados de la caracterización de los suelos finos a estabilizar

Muestra	% Que pasa	LL	LP	IP	Clasificación	Hum. óptima	Dens. máx.	CBR	CBR
	tamiz N°200				SUCS	(%)	(g/cm ³)	95 (%)	100 (%)
M-1	85.26	25	23	2	ML	11	1.96	3	4
M-2	89.59	30	16	14	CL	14	1.82	2	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2: Resumen de resultados de la estabilización mediante Bischofita

Muestra	Descripción	LL	LP	IP	Hum. óptima	Dens. máx.	CBR al	CBR al
					(%)	(g/cm ³)	95 (%)	100 (%)
M-1 limo	1% Bischofita	24	18	6	11	1.91	1	2
	3% Bischofita	23	16	8	10	1.96	6	7
	5% Bischofita	24	15	9	10	1.97	4	5
	7% Bischofita	25	14	10	9	2.03	3	4
M-2 arcilla	1% Bischofita	38	24	14.1	13	1.86	3	4
	3% Bischofita	37	23	14	11	1.84	7	9
	5% Bischofita	40	26	13.8	11	1.88	3	4
	7% Bischofita	38	24	13.6	12	1.89	3	3

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis de la estabilización suelo - Bischofita

Suelos estabilizados con Bischofita

Los resultados presentados a continuación provienen de un análisis de los valores de CBR obtenidos a partir de la combinación del porcentaje óptimo de Bischofita con los suelos clasificados como A-4(8) y A-6(10).

Para asegurar un grado aceptable de confiabilidad en este análisis, se llevará a cabo un estudio estadístico sobre los resultados obtenidos, utilizando técnicas de estadística descriptiva e inferencial. El criterio principal para este estudio será la comparación entre las medias muestrales y las medias teóricas. Para ello, se aplicará la prueba t de Student,

que permitirá corroborar las diferencias significativas en relación con los valores técnicos establecidos en este análisis.

4.3 Análisis estadístico

En las tablas se puede observar el tratamiento estadístico para las mezclas de aditivo Bischofita con las muestras seleccionadas.

4.3.1 Estadística descriptiva

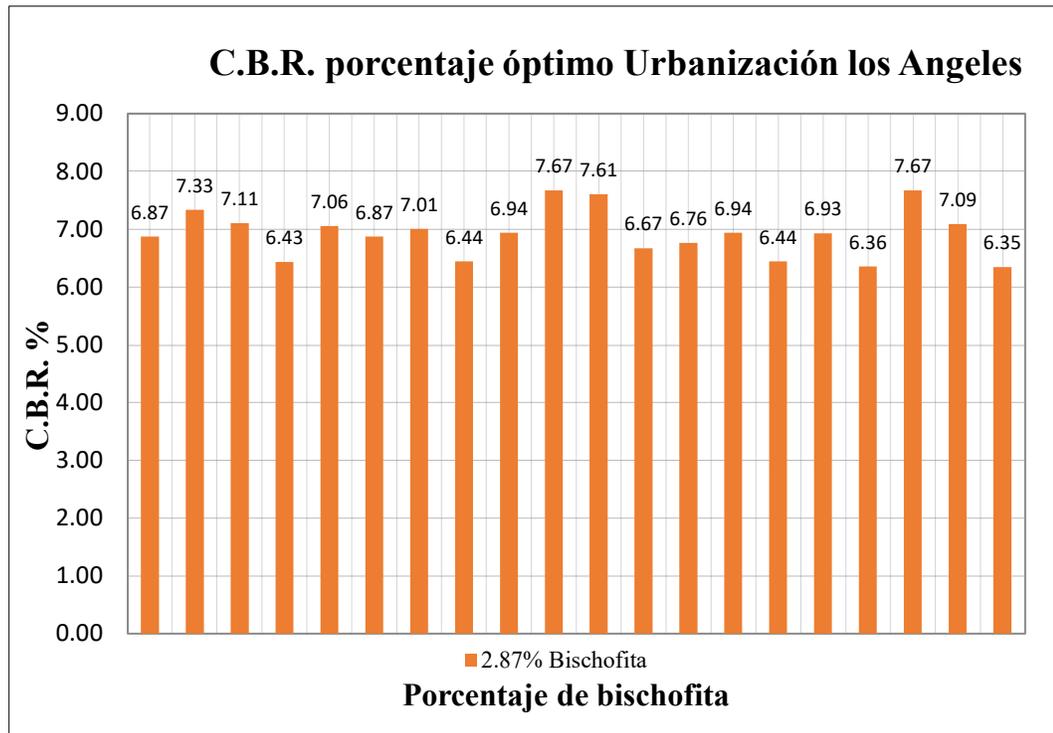
En esta sección se presenta un análisis estadístico descriptivo de los valores de CBR obtenidos de la combinación del porcentaje óptimo del aditivo con los suelos finos.

Tabla 4.3: Valores de C.B.R. óptimos M-1

Muestra	Dosificación (%)	CBR (%)
Barrio Tarijeños en Progreso A-6(10) M-2	2.87% de Bischofita	6.87
		7.33
		7.11
		6.43
		7.06
		6.87
		7.01
		6.44
		6.94
		7.67
		7.61
		6.67
		6.76
		6.94
		6.44
		6.93
		6.36
		7.67
7.09		
6.35		
Media		6.93
D, estándar		0.42
Varianza		0.17
Coeficiente de variación		6.01

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1: CBR 2.87 % óptimo de Bischofita M1



Fuente: Elaboración propia

Distribución de frecuencias

CBR. máximo = 7.67

CBR. mínimo = 6.35

Rango = 1.32

N

n= 20

NC = $1+3.322 \log(n)$

NC = 5.189316586

NC = 5

Ancho de clase

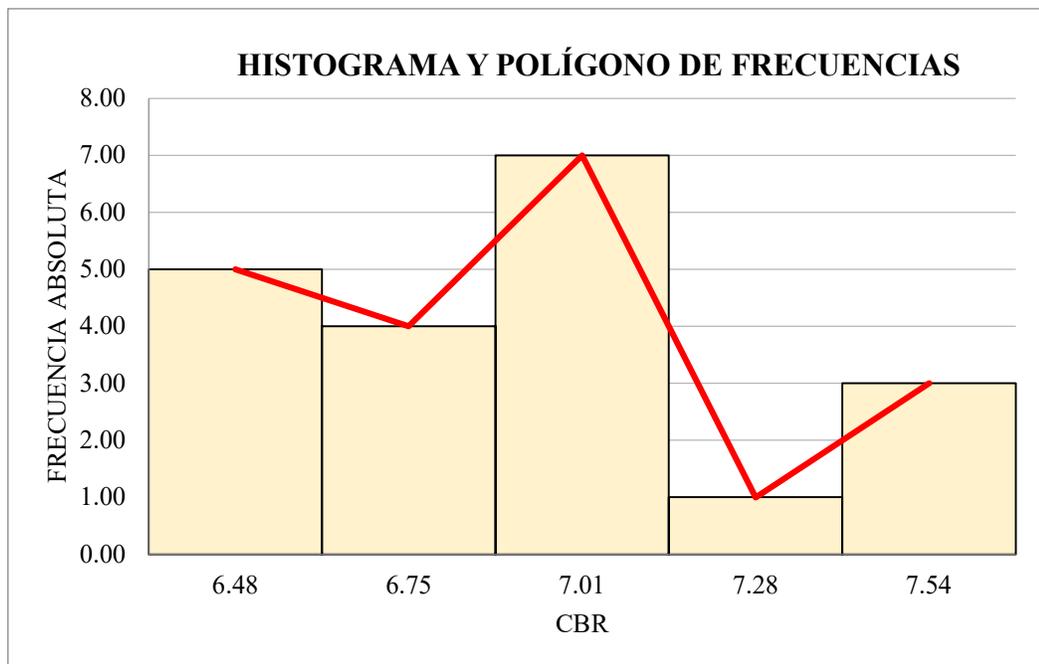
Ancho de clase = 0.26

Tabla 4.4: Distribución de frecuencias

Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[6.35 - 6.61[	6.48	5.00	5.00	25.00	25.00
[6.61- 6.88[	6.75	4.00	9.00	20.00	45.00
[6.88 - 7.14[	7.01	7.00	16.00	35.00	80.00
[7.14 - 7.41[	7.28	1.00	17.00	5.00	85.00
[7.41 - 7.67[	7.54	3.00	20.00	15.00	100.00
		20.00			

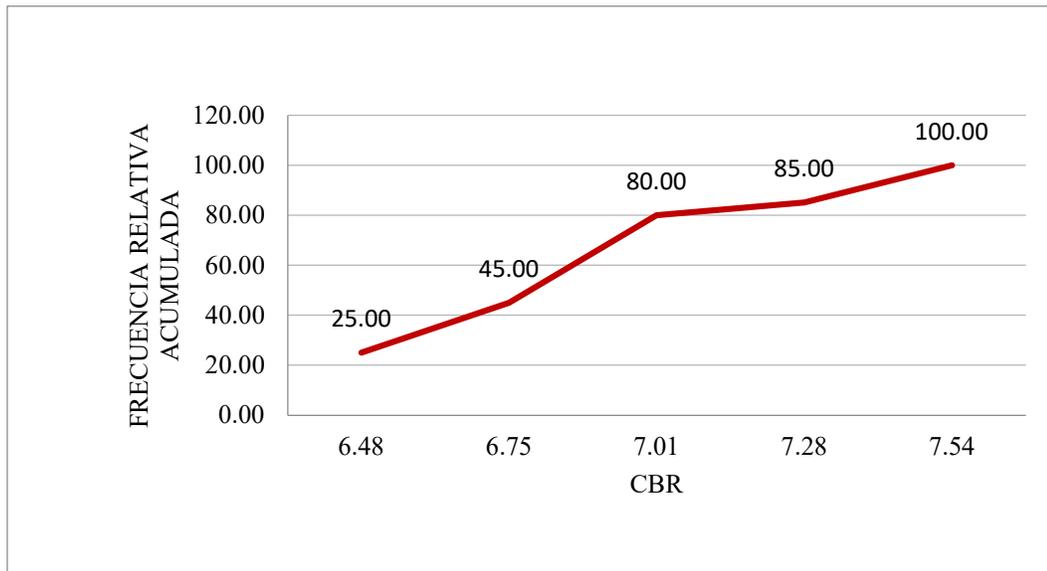
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2: Histograma y polígono de frecuencia variable CBR



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3: Polígono de frecuencias acumuladas CBR



Fuente: Elaboración propia

La mayoría de los valores del CBR se concentran en el intervalo de [6.88 - 7.14]%, que tiene una frecuencia absoluta de 7 (35%). Este intervalo representa los resultados más comunes y cercanos a la media, indicando una tendencia central alrededor de este rango.

La baja dispersión (desviación estándar de 0.42%) y el coeficiente de variación de 6.01% indican que los resultados son consistentes, con poca variabilidad entre las muestras.

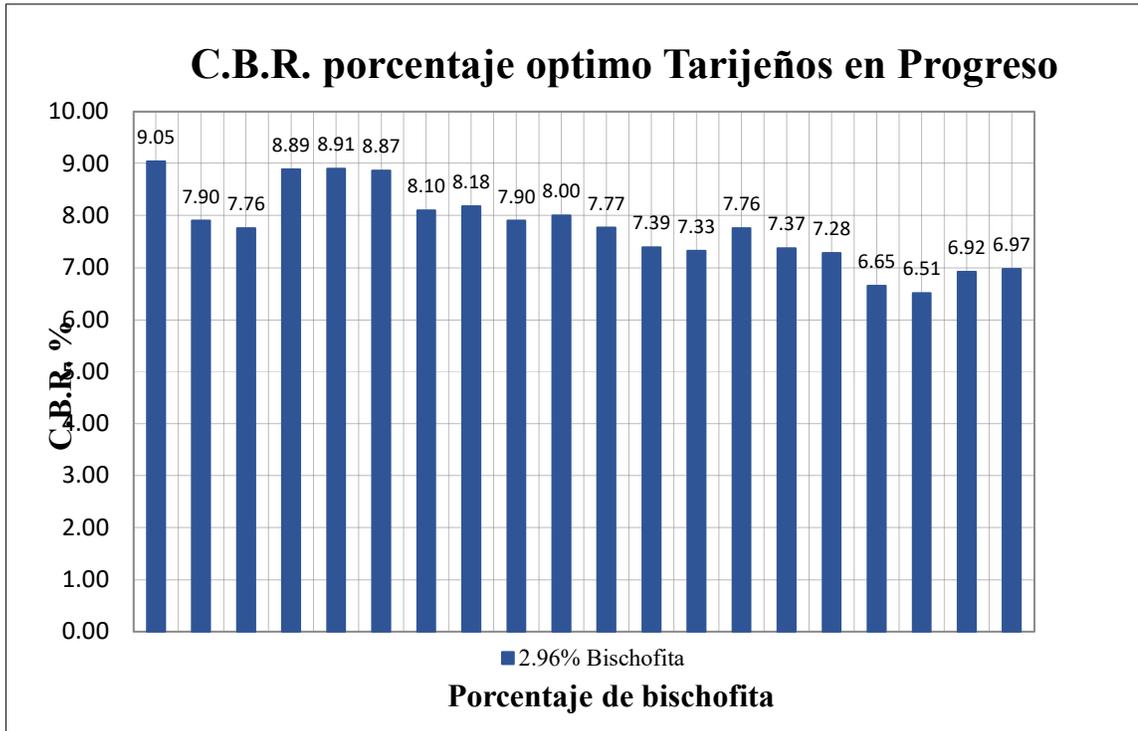
- El análisis de frecuencias del CBR para el suelo M-2 estabilizado con 2.87% de Bischofita muestra una mejora uniforme y consistente en la capacidad de soporte, con un valor promedio de **6.93%**.
- La concentración de datos alrededor del intervalo más frecuente indica que este porcentaje de estabilizador es eficaz y que las propiedades del suelo estabilizado son predecibles y homogéneas, lo cual es favorable para su aplicación en subrasantes de caminos no pavimentados.

Tabla 4.5: Valores de PC.B.R. óptimos M-2

Muestra	Dosificación (%)	CBR (%)
Barrio Tarijeños en Progreso A-6(10) M-2	2.96% de Bischofita	9.05
		7.90
		7.76
		8.89
		8.91
		8.87
		8.10
		8.18
		7.90
		8.00
		7.77
		7.39
		7.33
		7.76
		7.37
		7.28
		6.65
6.51		
6.92		
6.97		
Media		7.78
D. estándar		0.75
Varianza		0.56
Coefficiente de variación		9.65

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4: CBR 2.96 % óptimo de Bischofita M1



Fuente: Elaboración propia

Distribución de frecuencias

CBR. Máximo = 9.05

CBR. Mínimo = 6.51

Rango = 2.54

N

n= 20

NC = $1+3.322 \log(n)$

NC = 5.189316586

NC = 5

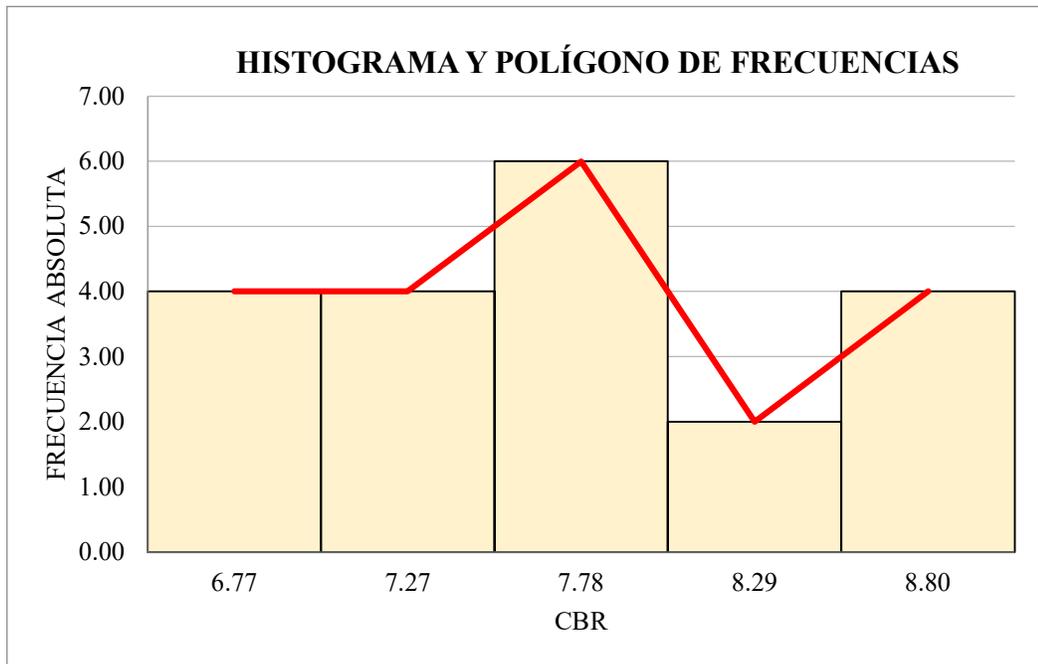
Ancho de clase

Ancho de clase = 0.51

Tabla 4.6: Distribución de frecuencias

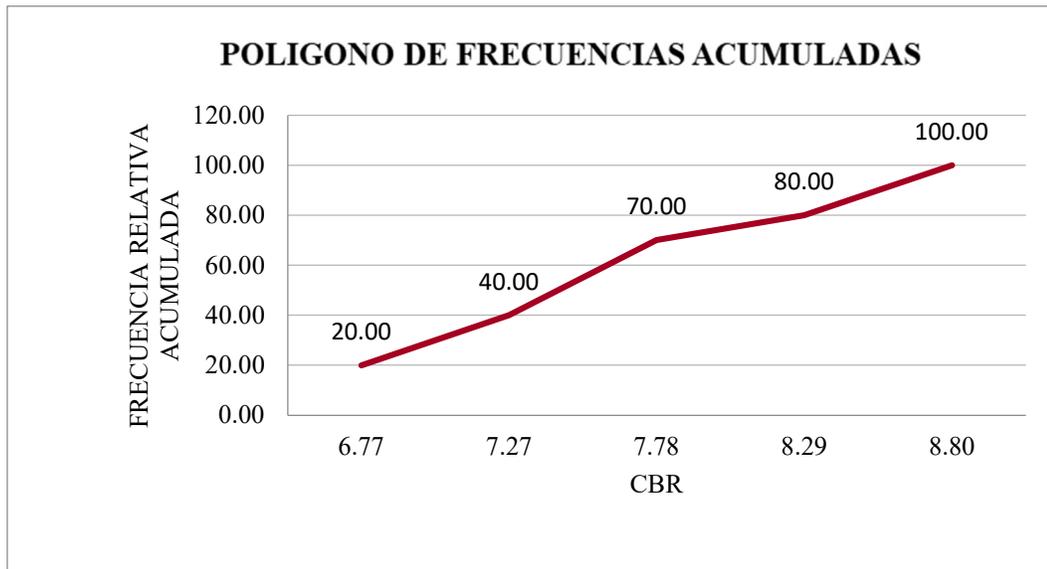
Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[6.51 - 7.02[	6.77	4.00	4.00	20.00	20.00
[7.02 - 7.52[	7.27	4.00	8.00	20.00	40.00
[7.52 - 8.03[	7.78	6.00	14.00	30.00	70.00
[8.03 - 8.54[	8.29	2.00	16.00	10.00	80.00
[8.54 - 9.05[	8.80	4.00	20.00	20.00	100.00
		20.00			

Figura 4.5: Histograma y polígono de frecuencia variable CBR



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6: Polígono de frecuencias acumuladas variable CBR



Fuente: Elaboración propia

El intervalo con mayor frecuencia absoluta es [7.52 - 8.03]%, con 6 observaciones (30%). Este intervalo representa los valores más comunes y cercanos a la media.

La desviación estándar de 0.75% y el coeficiente de variación de 9/65% reflejan una variabilidad moderada en los resultados. Esto sugiere que la respuesta del suelo M-2 al 2.96% de Bischofita es más dispersa en comparación con el 2.87%.

El 70% de los datos se encuentran por debajo de un CBR de 8.03%, mientras que el 30% restante representa valores más altos, indicando una distribución ligeramente sesgada hacia los valores superiores

- El análisis muestra que el suelo M-2 estabilizado con 2.96% de Bischofita tiene un CBR promedio de **7.78%**, con una ligera dispersión de los datos.
- La mayoría de las observaciones están concentradas alrededor de la media, lo que indica que este porcentaje de Bischofita es eficaz para estabilizar el suelo.

4.3.2 Estadística inferencial

Para el análisis de la estadística inferencial se procedió a determinar, la media y la desviación estándar necesarios para determinar si la prueba de hipótesis es verídica o no, además de determinar el intervalo de confianza con el cual se tratará de encontrar un par de números que formaran un intervalo donde estará inserto el parámetro buscado.

Para el suelo M1 limoso

Media	6.93
D. estándar	0.42
Varianza	0.17
Coefficiente de variación	6.01

Intervalo de confianza:

Como el tamaño de la muestra es menor a 30 y se conoce el valor de la media muestral y la varianza, se procede a usar la siguiente formula:

Tabla 4.7: Intervalo de confianza

Tamaño de muestra	Se conoce	Aproximación para la media poblacional (μ)
$n \geq 30$	σ^2 y z	$\mu = \bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$
$n \geq 30$	Solo z	$\mu = \bar{x} \pm z \frac{s}{\sqrt{n}}$
$n < 30$	σ^2 y z	$\mu = \bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$
$n < 30$	Solo "t"	$\mu = \bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}}$

Fuente: Guía de criterios de investigación en Ingeniería Civil, Luis Alberto Yurquina

$$\mu = \bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Límite superior

$$\mu = 6.93 + 1.96 * \frac{0.42}{\sqrt{20}}$$

$$\mu = 8.99$$

Límite inferior

$$\mu = 6.93 - 1.96 * \frac{0.42}{\sqrt{20}}$$

$$\mu = 8.78$$

Estos resultados indican que los valores que estén dentro de este intervalo de confianza gozan del nivel de confianza propuesto para este estudio.

4.3.2.1 Prueba de hipótesis

Según el comportamiento que se puede ver en el histograma de frecuencias, ya que sigue una tendencia casi normal, pero no se cuentan con un número de datos los cuales sean mayores a 30, se opta por elegir la prueba t Student para muestras únicas ya que esta prueba se adecua de mejor manera al contemplar un número de datos menores a 30 para su análisis.

Para validar nuestra hipótesis general, se recurrió a una media teórica. Esta media se define como el valor esperado del CBR de suelos finos sin tratamiento o bajo condiciones estándar de estabilización. La elección de una media teórica es esencial porque proporciona un punto de referencia claro y cuantificable para evaluar el efecto de la Bischofita.

La media teórica se basa en estudios previos, valores de referencia, lo que la convierte en un estándar confiable. Al establecer esta base teórica, podemos medir de manera precisa si los resultados experimentales obtenidos superan las expectativas, por lo tanto, si la Bischofita realmente contribuye a la mejora del C.B.R.

Esta prueba plantea dos tipos de hipótesis:

Hipótesis nula (H₀): “La adición de bischofita, no mejora el C.B.R. de las subrasantes con suelo fino”.

La media del C.B.R. de la muestra experimental es igual a la media teórica (por ejemplo, $\mu = \mu_0$).

Esta hipótesis establece que no hay diferencia significativa entre la media del C.B.R. de los suelos tratados con Bischofita y la media teórica esperada.

Si se acepta la hipótesis nula, significa que la Bischofita no tiene un efecto notable en la mejora de la capacidad de soporte del suelo C.B.R.. Esto podría indicar que el uso de Bischofita no es beneficioso.

Hipótesis alternativa (H₁): “La adición de bischofita, si mejora el C.B.R. de las subrasantes con suelo fino”.

La media del C.B.R. de la muestra experimental es diferente a la media teórica (por ejemplo, $\mu \neq \mu_0$).

Esta hipótesis propone que existe una diferencia significativa entre la media del C.B.R. de los suelos tratados con Bischofita y la media teórica.

Si se acepta la hipótesis alternativa, se concluye que la Bischofita tiene un impacto en la mejora de las propiedades mecánicas del suelo. Esto significa que la adición de Bischofita resulta en un aumento en la capacidad de soporte del suelo C.B.R., validando así el uso de este estabilizador químico.

Figura 4.7: Determinación del valor teórico recomendado

Categorías de Sub rasante	CBR
So: Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Sub rasante Insuficiente	De CBR > 3% A CBR < 6%
S2: Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S3: Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S4: Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S5: Sub rasante Excelente	CBR ≥ 30%

Fuente: Manual de suelos, Geología, geotecnia y pavimentos 1981.

Para determinar el p-valor se recurrirá a la tabla t Student con un grado de libertad igual a 19.

Tabla 4.8: Valores de t Student

El valor de la tabla para p y C es el valor crítico t^* que deja una probabilidad p a la derecha y una probabilidad C entre $-t^*$ y t^*

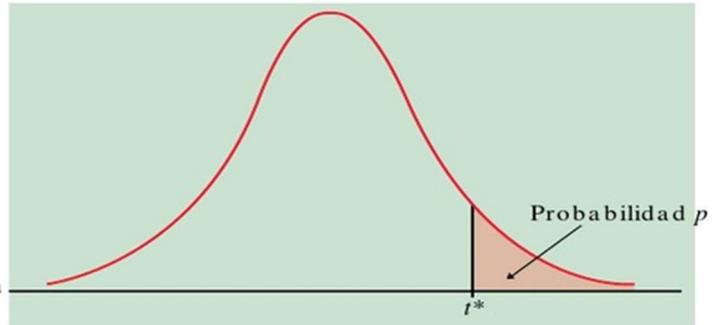


TABLA B Valores críticos de la distribución t de Student												
gl	Probabilidad de la cola p											
	.25	.20	.15	.10	.05	.025	.02	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	15.89	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	4.849	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	3.482	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	2.999	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	2.757	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	2.612	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.517	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.449	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.398	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.359	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.328	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.303	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.282	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.264	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.249	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.235	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.224	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.214	2.552	2.878	3.197	3.611	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.205	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.197	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.189	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.183	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.177	2.500	2.807	3.104	3.485	3.768
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.172	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.167	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.162	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.158	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.154	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.150	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.147	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.123	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.109	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.099	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.088	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.081	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390
1000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.056	2.330	2.581	2.813	3.098	3.300
z^*	0.674	0.841	1.036	1.282	1.645	1.960	2.054	2.326	2.576	2.807	3.091	3.291
	50%	60%	70%	80%	90%	95%	96%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%
	Nivel de confianza C											

Dando como resultado:

$$t \text{ critico} = 2.093$$

$$9.96 > 2.093 \quad \text{Verdadero}$$

Se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto, se asume la hipótesis alternativa, la cual indica que la media de la muestra es diferente a la media teórica.

Analizando la hipótesis propuesta para esta presente investigación, se puede establecer que: La incorporación de Bischofita mejora la propiedad mecánica CBR de la sub rasante. Sugiere una hipótesis alternativa: $H_1: X > u$ con dirección de la cola hacia la derecha. Por lo tanto, se puede asegurar que:

El valor obtenido de CBR es significativamente mayor y que esa diferencia es estadísticamente significativa. Dando como resultado que la prueba de hipótesis verifique como positiva a la hipótesis de investigación.

Para suelo Arcilloso M2

Se realiza el mismo procedimiento para obtener el valor de CBR significativo para la prueba de hipótesis.

Media	7.78
Mediana	7.77
D. estándar	0.75
Varianza	0.56
Coefficiente de variación	9.66

Intervalo de confianza

$$\mu = \bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Límite superior

$$\mu = 7.78 + 1.96 * \frac{0.75}{\sqrt{20}}$$

$$\mu = 9.84$$

Límite inferior

$$\mu = 7.78 - 1.96 * \frac{0.75}{\sqrt{20}}$$

$$\mu = 9.63$$

Cálculo de la estadística t: La fórmula es:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Media teórica 6 % CBR

Media de la muestra 7.78

Desviación estándar de la muestra 0.75

Tamaño de la muestra 20

Nivel de confianza 95 %

Grados de libertad 19

Nivel de confianza 95 %

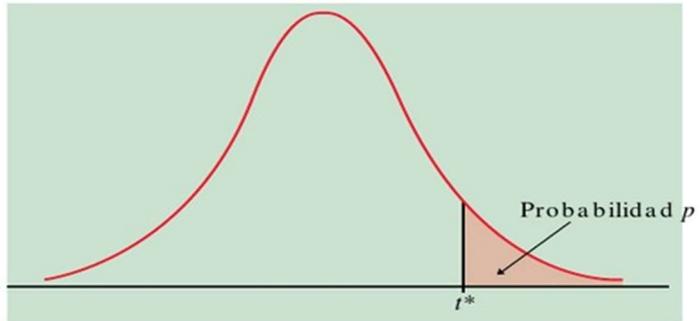
Remplazando:

$$t = \frac{7.78 - 6}{\frac{0.75}{\sqrt{20}}}$$

t calculado = 10.59

Para determinar el p-valor se recurrirá a la tabla t Student con un grado de libertad igual a 19.

Tabla 4.9: Valores de t Student



El valor de la tabla para p y C es el valor crítico t^* que deja una probabilidad p a la derecha y una probabilidad C entre $-t^*$ y t^*

TABLA B Valores críticos de la distribución t de Student												
gl	Probabilidad de la cola p											
	.25	.20	.15	.10	.05	.025	.02	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	15.89	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	4.849	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	3.482	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	2.999	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	2.757	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	2.612	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.517	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.449	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.398	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.359	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.328	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.303	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.282	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.264	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.249	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.235	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.224	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.214	2.552	2.878	3.197	3.611	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.205	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.197	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.189	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.183	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.177	2.500	2.807	3.104	3.485	3.768
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.172	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.167	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.162	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.158	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.154	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.150	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.147	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.123	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.109	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.099	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.088	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.081	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390
1000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.056	2.330	2.581	2.813	3.098	3.300
z^*	0.674	0.841	1.036	1.282	1.645	1.960	2.054	2.326	2.576	2.807	3.091	3.291
	50%	60%	70%	80%	90%	95%	96%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%
	Nivel de confianza C											

Dando como resultado:

$$t \text{ critico} = 2.093$$

$$10.59 > 2.093 \text{ Verdadero}$$

Se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto, se asume la hipótesis alternativa, la cual indica que la media de la muestra es diferente a la media teórica.

Analizando la hipótesis propuesta para esta presente investigación, se puede establecer que:

La incorporación Bischofita en suelos finos, mejora sus propiedades mecánicas. Sugiere una hipótesis alternativa: $H_1: X > u$ con dirección de la cola hacia la derecha.

Por lo tanto, se puede asegurar que:

El valor obtenido de CBR es mayor y que esa diferencia es estadísticamente significativa.

Esto quiere decir que las mejoras obtenidas son significativas y la hipótesis de investigación sea aceptada.

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 y limoso proveniente de la Segunda Circunvalación barrio los ángeles y Tarijeños en Progreso para suelo natural y posteriormente estabilizado aplicando Bischofita, llegamos a las siguientes conclusiones:

- Durante el proceso de identificación, se seleccionaron suelos de tipo limo (M-1) y arcilla (M-2) como representativos de las subrasantes naturales en el área de estudio. Estos suelos presentaron características típicas de suelos finos, como alta plasticidad y baja capacidad de soporte. Estos suelos son adecuados para la investigación, ya que su estabilización es crucial para mejorar las características de subrasantes en proyectos viales. La elección de estos suelos permitió establecer un marco comparativo para evaluar el impacto de la **Bischofita** en suelos finos.
- La caracterización inicial de los suelos mostró que el suelo M-1 (limo) presentaba un CBR de 4%-5%, mientras que el suelo M-2 (arcilla) tenía un CBR de 2%-3%.
- En los ensayos realizados para evaluar la influencia de la Bischofita en las propiedades mecánicas de los suelos finos se establecieron cuatro dosis de Bischofita para los ensayos: 1%, 3%, 5% y 7%. Los resultados mostraron que el porcentaje óptimo de Bischofita para mejorar las propiedades de los suelos fue 2.87% para el suelo limoso (M-1) y 2.96% para el suelo arcilloso (M-2). Estos porcentajes fueron los más efectivos para mejorar el CBR sin presentar efectos negativos por sobresaturación. Los porcentajes mayores no generaron mejoras adicionales, e incluso, en algunos casos, redujeron la capacidad de soporte del suelo.
- Los análisis estadísticos realizados mediante prueba t de Student confirmaron que las mejoras en la capacidad de soporte (CBR) son estadísticamente significativas con los porcentajes de Bischofita de 2.87% para el suelo limoso y 2.96% para el suelo arcilloso. Los resultados mostraron que las dosis de Bischofita en estos

porcentajes mejoraron significativamente la capacidad de carga de los suelos sin presentar mejoras adicionales al aumentar la dosis más allá del 3%. Los análisis validaron la eficiencia de estas dosis para estabilizar los suelos.

- Las dosis superiores al 3% (5% y 7%) no proporcionaron beneficios adicionales y en algunos casos redujeron la resistencia del suelo, probablemente debido a la sobresaturación de la mezcla.

5.2 Recomendaciones

- 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.
- 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.
- Se aconseja analizar los resultados obtenidos para determinar la dosificación óptima, teniendo en cuenta el uso previsto del material estabilizado.
- En áreas con condiciones de alta humedad o precipitaciones constantes, se recomienda planificar aplicaciones periódicas de Bischofita, ya que el mineral es susceptible a la lixiviación. La lixiviación podría disminuir la efectividad del estabilizador, por lo que un monitoreo continuo y la re-aplicación de Bischofita podrían ser necesarias.
- Se recomienda realizar estudios adicionales sobre la **durabilidad a largo plazo** de los suelos estabilizados con Bischofita, especialmente en condiciones climáticas extremas. Estos estudios deben incluir ensayos que simulen ciclos de humedecimiento y secado, así como la exposición prolongada a las condiciones ambientales para evaluar la degradación potencial del estabilizado.